

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Výkonová část reverzibilního DC/DC měniče
Power Part of Reversible DC/DC Converter

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Bohnjat**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T015 Elektronika
Téma: **Výkonová část reverzibilního DC/CD měniče**
Power Part of Reversible DC/DC Converter

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte a zhodnoťte současný stav topologií pro obousměrný přenos energie v soustavách obnovitelných zdrojů s akumulacími systémy.
2. Vyberte a navrhnete vhodné topologie výkonové části pro obousměrný přenos energie mezi stejnosměrnými systémy s využitím polovodičových měničů.
3. Pro vybrané řešení proveďte analýzu funkce a dimenzování soustavy i polovodičového měniče.
4. Funkci vybraného řešení ověřte pomocí numerického modelování, příp. dle pokynů vedoucího diplomové práce vybrané řešení realizujte a ověřte na laboratorním modelu.

Seznam doporučené odborné literatury:

Krejčířík, A.: Moderní spínané zdroje, BEN-Technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-303-6

Faktor, Z.: Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje - teorie, příklady návrhu, měření, BEN-Technická literatura, 2002, ISBN 80-86056-91-0

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika-měniče s vlastní komutací a bez komutace, svazek 3, Plzeň 2003, ISBN 80-7082-980-X

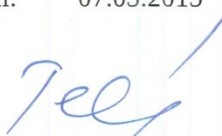
Další literatura dle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 7.5.2015


.....
podpis studenta

Poděkování

Tímto děkuji prof. Ing. Petru Chlebišovi, CSc. za ochotnou pomoc během odborných konzultací při vedení diplomové práce. Také děkuji Ing. Martinovi Borskému a Ing. Jiřímu Špičkovi za poskytnuté praktické rady.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem výkonové části reverzibilního DC/DC měniče. V teoretické části je nejprve proveden rozbor topologií pro obousměrný přenos elektrické energie v soustavách obnovitelných zdrojů s akumulacími systémy. Poté jsou uvedena různá řešení obvodových zapojení reverzibilních DC/DC měničů jak bez galvanického oddělení, tak s galvanickým oddělením. V praktické části je navrženo konkrétní obvodové řešení reverzibilního DC/DC měniče. Je proveden rozbor funkce tohoto měniče a následné dimenzování a výběr jednotlivých součástí pro realizaci. Dimenzování výkonové části zahrnuje návrh impulzního transformátoru, chlazení, výběr vhodných budičů, tranzistorů a dalších prvků. Funkce konkrétního řešení DC/DC měniče je ověřena simulačním programem OrCAD PSpice při obou směrech přenosu energie a různě nastavených parametrech. Pro vizualizaci navrženého řešení je vytvořen 3D model měniče.

Klíčová slova

Obousměrný DC/DC měnič, dimenzování, simulace, 3D model

Abstract

The diploma thesis deals with a design of power part of reversible DC/DC converter. In the theoretic part, firstly there is an analysis of topologies for bidirectional energy transfer in renewable energy systems with accumulative units. Then there are introduced various solutions of circuit connections of reversible DC/DC converters both non-isolated and isolated. In the practical part, there is a design of a specific circuit of reversible DC/DC converter. The function analysis of the converter and subsequent dimensioning and selection of components for realization is carried out. The dimensioning of power part includes a design of impulse transformer, cooling, selection of suitable drivers, transistors and other components. The function of the specific DC/DC converter is verified with simulation software OrCAD PSpice during both directions of energy transfer and different parameters. 3D model of designed converter is created for visualization.

Key Words

Reversible DC/DC converter, dimensioning, simulation, 3D model

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
A_m	m^2	průřez jádra
B_{MAX}	T	maximální magnetická indukce
B_{SAT}	T	saturační hodnota magnetické indukce
E_{cond}	J	energie při vedení tranzistoru
E_{off}	J	energie při vypínání tranzistoru
E_{on}	J	energie při zapínání tranzistoru
f	Hz	frekvence
I_{CM}	A	maximální proud kolektorem
I_{FM}	A	maximální proud zpětnou diodou
I_{FRMS}^2	A^2	druhá mocnina efektivní hodnoty proudu
I_{PM}	A	rozsah primárního proudu snímače
I_{PN}	A	primární jmenovitý proud snímače
I_{SN}	A	sekundární jmenovitý proud snímače
J	A/m^2	proudová hustota
L	H	indukčnost
N	-	počet závitů transformátoru
P_{FAV}	W	střední hodnota ztrátového výkonu
r_d	Ω	diferenciální odpor diody
R_{thc-h}	K/W	tepelný odpor pouzdro – chladič
R_{thh-a}	K/W	tepelný odpor chladič – okolí
R_{thj-c}	K/W	tepelný odpor přechod – pouzdro
S	m^2	průřez vodiče
T	s	perioda
T_a	$^{\circ}C$	teplota okolí
T_C	$^{\circ}C$	teplota pouzdra
t_{cond}	s	doba vedení proudu
T_h	$^{\circ}C$	teplota chladiče
T_j	$^{\circ}C$	teplota přechodu
t_{VYP}	s	doba vypnutí
t_{ZAP}	s	doba zapnutí
U_C	V	napájecí napětí
U_{CEM}	V	maximální napětí mezi kolektorem a emitorem
U_{CESAT}	V	saturační napětí tranzistoru
U_{min}	V	minimální vstupní napětí
U_{PN}	V	rozsah měřeného napětí snímače
U_{T0}	V	prahové napětí diody
z	-	zatěžovatel
ΔB	T	zdvih magnetické indukce
Δi_z	A	zvlnění proudu

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
EMC	Electromagnetic Compatibility	elektromagnetická kompatibilita
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
IGD	Intelligent Gate Driver	výkonová část budiče
LDI	Logic-to-Driver Interface	rozhraní mezi řídicí částí a budičem
PW	Pulse Width	šířka pulzu
TD	Time Delay	doba zpoždění
TF	Time Fall	doba poklesu
TR	Time Rise	doba nárůstu

Obsah

Úvod.....	1
1 Obnovitelné zdroje a topologie pro obousměrný přenos energie.....	2
1.1. Obnovitelné zdroje elektrické energie.....	2
1.2. Akumulační systémy.....	3
1.3 Topologie obnovitelných zdrojů s obousměrným přenosem energie.....	6
1.3.1 Topologie se společným stejnosměrným obvodem.....	6
1.3.2 Topologie se společným střídavým obvodem.....	7
1.3.3 Topologie se společným střídavým a stejnosměrným obvodem.....	7
1.3.4 Zapojení reverzibilních DC/DC měničů.....	8
2 Topologie výkonových částí měničů pro obousměrný přenos energie mezi stejnosměrnými systémy.....	10
2.1 Měniče bez galvanického oddělení.....	10
2.1.1 Měnič s reverzací proudu.....	10
2.1.2 Měnič s reverzací proudu – zvyšující či snižující.....	11
2.2 Měniče s galvanickým oddělením.....	12
2.2.1 Dvojitý aktivní můstek.....	12
2.2.2 Dvojitý aktivní můstek proudového typu.....	14
2.2.3 Dvojitý polomůstek.....	15
3 Konkrétní řešení vybrané topologie měniče.....	17
3.1 Popis zapojení a funkce.....	17
3.2 Výběr součástek a dimenzování.....	19
3.2.1 Tranzistory.....	19
3.2.2 Budiče.....	19
3.2.3 Transformátor.....	22
3.2.4 Tlumivka a kondenzátory.....	24
3.2.5 Výpočet ztrát měniče.....	25
3.2.6 Dimenzování chlazení.....	26
3.2.7 Snímače napětí a proudu.....	28
3.2.8 Napájení.....	30
3.2.9 Řídicí systém.....	31
4 Simulace reverzibilního DC/DC měniče.....	32
4.1 Simulace měniče při toku energie ze zdroje U_1 do zdroje U_2	34
4.2 Simulace měniče při toku energie ze zdroje U_2 do zdroje U_1	35

5	3D model reverzibilního DC/DC měniče.....	37
	Závěr	40
	Použitá literatura	42

Úvod

S rozvojem obnovitelných zdrojů elektrické energie se vyvíjí i oblast polovodičových měničů používaných v daných topologiích. Měniče hrají důležitou roli v přeměně parametrů elektrické energie vyrobené obnovitelným zdrojem. Takové zdroje jsou především zdroje fotovoltaické, větrné nebo vodní. Pro tyto zdroje je charakteristická proměnlivost jejich výkonu, který je závislý na přírodních podmínkách. Pro vyrovnání bilance výroby a spotřeby elektrické energie se využívají různé typy akumulacních systémů. Ve spojitosti s těmito systémy polovodičové měniče slouží pro usměrnění a rozstředění elektrické energie (např. u větrných elektráren) či např. jako zvyšující měniče u fotovoltaických panelů. Přenos elektrické energie je často jednosměrný, tzn. vyrobená energie teče pouze od zdroje dále ke spotřebiči. Pokud však chceme použít akumulacní systémy energie, je nutné využití obousměrných polovodičových měničů. Tyto měniče umožňují přenos energie do akumulacního systému (baterie, superkapacitor) v době, kdy je této energie nadbytek. V době potřeby energie se naopak energie z akumulacního systému přenáší ke spotřebiči. Tyto reverzibilní měniče mají v podstatě na svých vstupech zdroje, mezi kterými je přenášen výkon v závislosti na zvoleném režimu a mohou být jak snižující, tak zvyšující. Základní rozdělení reverzibilních měničů je na měniče bez galvanického oddělení a měniče s galvanickým oddělením.

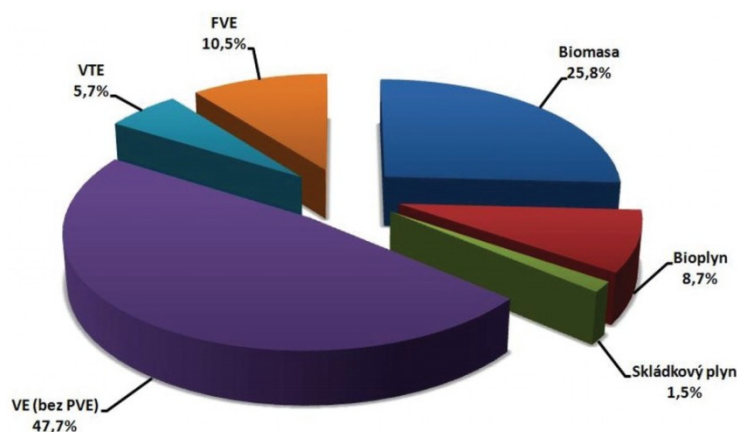
Tato práce se zabývá jednotlivými obvodovými strukturami reverzibilních DC/DC měničů jak bez, tak s galvanickým oddělením. Pro konkrétní řešení reverzibilního DC/DC měniče je proveden návrh obvodové struktury. To zahrnuje popis funkce měniče při jednotlivých režimech, výběr a dimenzování součástek a elektrických prvků a návrh samotného konstrukčního řešení. Konkrétní reverzibilní DC/DC měnič je řešen jako spojení dvou měničů, jejichž galvanické oddělení je zajištěno impulzním transformátorem. Jedna část měniče je napěťového charakteru, zatímco druhá část je charakteru proudového. Velikost přenášené energie z jedné strany na druhou se řídí změnou šířky jednotlivých pulzů, které se přivádí na primární vinutí transformátoru. Jako spínací prvky jsou použity IGBT tranzistory v modulovém provedení. Je proveden výpočet výkonových ztrát těchto modulů s následným dimenzováním a výběrem vhodného chlazení. Dále se práce zabývá dimenzováním impulzního transformátoru, výběrem budičů pro IGBT tranzistory a dalších obvodových prvků. Funkce navrženého obvodového řešení reverzibilního DC/DC měniče je ověřena simulací v programu OrCAD PSpice. Ve vytvořeném simulačním modelu je možné zadávat parametry pro funkci měniče jako frekvence a šířka pulzu pro řízení velikosti přenášené energie. Konstrukční návrh měniče bude proveden jako 3D model.

1 Obnovitelné zdroje a topologie pro obousměrný přenos energie

1.1. Obnovitelné zdroje elektrické energie

Obnovitelné zdroje elektrické energie v dnešní době hrají stále důležitější roli. Zásoba fosilních paliv se snižuje a celosvětová spotřeba elektrické energie roste. To klade důraz na rozvoj elektráren s obnovitelnými zdroji energie. Mezi hlavní obnovitelné zdroje patří větrná a vodní energie, sluneční záření, biomasa, energie přílivu a geotermální energie. Výhodou těchto zdrojů energie je, že jsou ekologicky čisté. Nevýhodou je však jejich nestabilita dodávané energie v čase. Pro kompenzaci tohoto nedostatku se používají topologie s akumulací systémů, které uchovávají energii v době, kdy samotný obnovitelný zdroj není schopen dodávat energii v dostatečné kvalitě. Takovým akumulacím systémem může být baterie nebo superkapacitor, ale také například vodní přečerpávací elektrárna.

V České republice pochází 8,24 % vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů (údaj z konce roku 2010). Na obrázku 1.1 je naznačen podíl jednotlivých obnovitelných zdrojů na výrobě energie. Plánuje se další rozšiřování využití obnovitelných zdrojů, na rok 2020 se předpokládá podíl 13 % ve výrobě energie. [1]



Obr. 1.1: Podíl využití jednotlivých obnovitelných zdrojů v ČR [1]

Fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaické elektrárny jsou vzhledem k životnímu prostředí nejčistší způsob výroby energie. Sluneční energie se přeměňuje na elektrickou v tzv. fotovoltaickém článku, který je tvořen PN přechodem. Dochází zde k fotoelektrickému jevu. Dopadající fotony na fotovoltaický článek uvolňují elektrony a vzniká pár elektron – díra. Ty jsou od sebe odděleny elektrickým polem PN přechodu a tím vzniká napěťový rozdíl mezi kontakty fotovoltaického článku.

Pojem fotovoltaický systém označuje soustavu fotovoltaického panelu s dalšími prvky, které jsou při provozu použity. Patří sem např. spotřebiče, měřicí přístroje, akumulátorová baterie a měniče. Prvním fotovoltaickým systémem je tzv. ostrovní systém (grid-off), který je nezávislý na rozvodné síti. Zřizuje se tam, kde se nevyplatí zavést elektrickou přípojku. Produkovaný špičkový

výkon je do 10 kW. Ostrovní systémy se dále dělí na systémy s akumulací, s přímým napájením a hybridní ostrovní systémy. Systémy s akumulací se používají v případě, kdy je třeba využití elektrické energie i ve chvíli, kdy na panely nedopadá sluneční záření. Pro uchování energie se používají akumulátorové baterie. Systém poskytuje síťové střídavé napětí 230 V, ale k dispozici je i stejnosměrné napětí 12 V nebo 24 V pro některé spotřebiče. Hybridní ostrovní systémy se vyskytují tam, kde je požadován trvalý provoz s velkým vytížením. Kvůli tomu, že fotovoltaická elektrárna poskytuje v zimním období menší výkon než v letním období, je nutné systém doplnit další alternativou. Tím je například vodní nebo větrná elektrárna. Síťový systém (grid-on) se vyznačuje tím, že fotovoltaický panel je připojen do rozvodné sítě pomocí střídače. Fotovoltaické panely tohoto systému se umísťují např. na střechách budov či jako samostatné elektrárny na větší ploše. [1, 10]

Vodní elektrárny

Výhodou vodních elektráren je, že vyrobená energie je levná a výrobou se nezatěžuje životní prostředí tolik jako například u uhelných elektráren. Vodní elektrárny fungují jako doplněk ostatních elektráren s vysokým výkonem. Jsou schopné rychle reagovat na špičkovou potřebu elektrické energie a také umožňují využití nadbytečné energie v době s malou spotřebou. Některé z nich plní i vodohospodářskou funkci. Vodní elektrárny se mohou dělit dle toho, zda jsou připojené do rozvodné sítě, a nebo jsou samostatné bez připojení a pracují pro užití energie v místě.

Hlavní výhody vodních elektráren jsou: zdroj čisté energie, regulují vodní tok, dodávají energii ve špičkách a akumulují přebytečnou energii. Nevýhodou je to, že potenciál velkých vodních elektráren je již v České republice vyčerpán. Zbývají pouze malé vodní toky, které se vyznačují velkým kolísáním průtoku, musí proto být doplněny nějakými systémy akumulace. Nevýhodou je i to, že při stavbě elektráren dochází k zásahu do okolní krajiny. [1, 10]

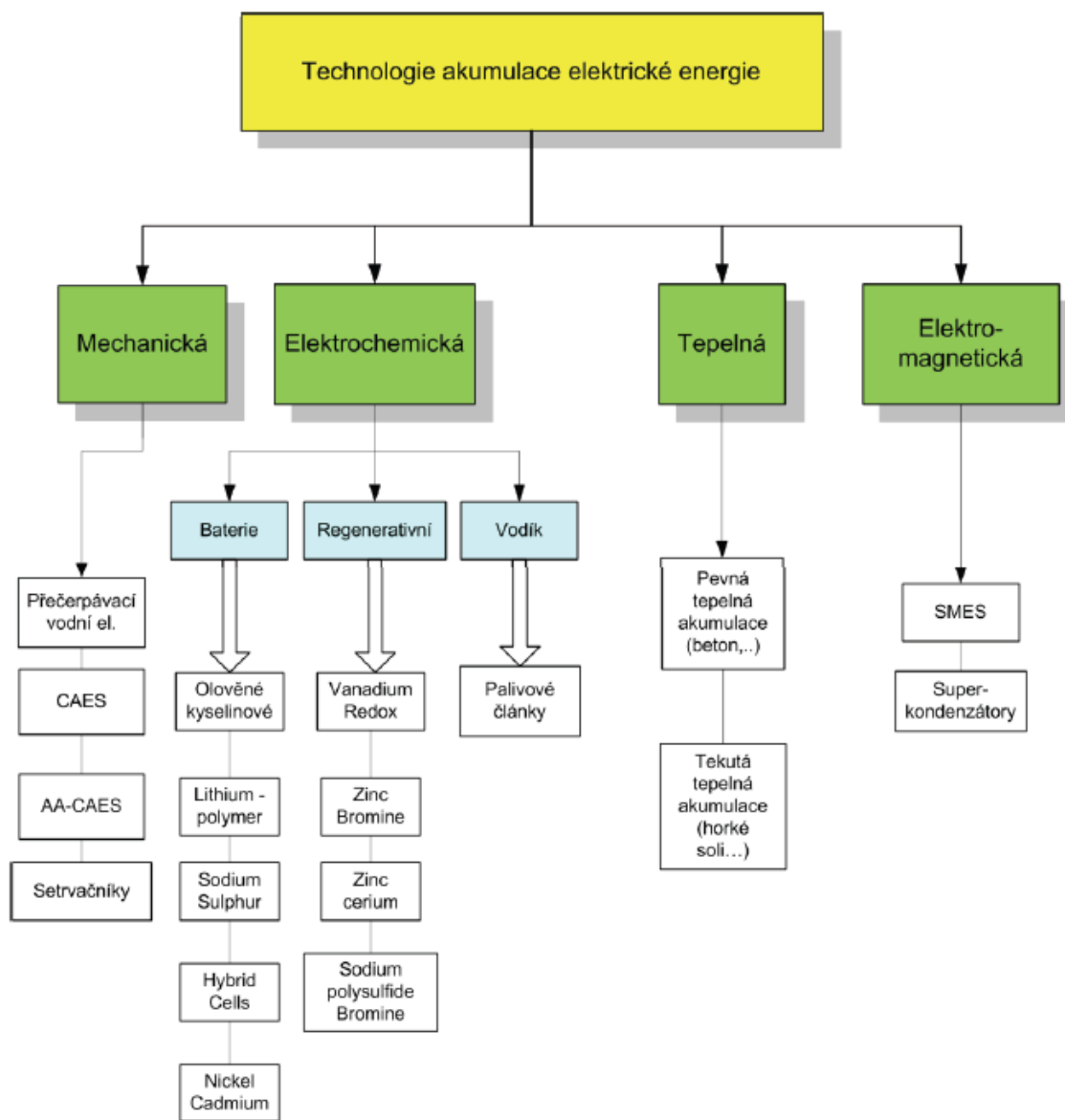
Větrné elektrárny

Větrné elektrárny přeměňují kinetickou energii větru na elektrickou energii. Většina velkých větrných elektráren je provozována ve spojení se sítí, která absorbuje kolísání výkonu v závislosti na rychlosti větru. V ostrovních systémech však musí být větrná elektrárna doplněna akumulačním systémem, který kolísání výkonu vyrovnává. Výhodou je čistá a levná energie, nevýhodou je provedení zásah do krajiny a zejména nepředvídatelnost množství vyrobené energie. [1, 10]

1.2. Akumulační systémy

Akumulace elektrické energie se provádí různými technologickými způsoby. Systémy akumulace se dělí dle hledisek jako je kapacita, počet cyklů, forma ukládání energie, rychlost reakční doby, požadovaný výkon. Samotné technologie akumulace energie lze rozdělit do několika základních skupin dle typu přeměny energie. První skupina je s mechanickou přeměnou energie. Patří sem využití kinetické energie (setrvačníky), potenciální energie (přečerpávací elektrárny) a tlakové energie (energie je uložena ve stlačeném vzduchu – tato technologie je označena zkratkou CAES – Compressed Air Energy Storage). Dále je používána elektrochemická přeměna energie. Energie uchovává v elektrochemických akumulátorech - elektrická energie se přeměňuje na

chemickou a při potřebě zpět na elektrickou; chemickou akumulací se rozumí skladování energie pomocí vodíku, který je vyroben elektrolyzou. Další skupina využívá tepelné přeměny. Energie se akumuluje ve formě tepla v různých médiích – ve vodě nebo látkách jako kámen, cihla, beton. Poslední skupina využívá elektromagnetické přeměny energie – energie se ukládá do magnetického pole. [1]



Obr. 1.2: Přehled technologií pro akumulaci elektrické energie [1]

Z hlediska použití akumulačních systémů v obnovitelných zdrojích hrají nejdůležitější roli baterie a superkapacity. Například pro akumulaci energie z fotovoltaických elektráren se používají lithium-iontové nebo olověné akumulátory. Některé elektrochemické a elektromagnetické zdroje jsou popsány dále. Je třeba zmínit, že technologie akumulačních systémů se neustále vyvíjejí. Uvedený výčet akumulačních technologií není zdaleka konečný, jsou zmíněny pouze některé z nejdostupnějších technologií.

Superkapacitor

Superkapacitory mají oproti akumulátorům několik výhod. Hlavními z nich jsou například vysoký počet cyklů, malý vnitřní odpor, rychlé nabití, vysoká účinnost (více než 95 %). Nevýhodou superkapacitoru je malé maximální napětí a také to, že jsou dražší.

Superkapacitor se skládá ze dvou hliníkových elektrod, mezi kterými je separátor. V prostoru mezi separátorem a elektrodami jsou vrstvy aktivního uhlíku. Při přiložení napětí na elektrody se záporné částice začnou přitahovat směrem ke kladné elektrodě a kladné částice k záporné elektrodě. Vytvoří se tak na obou elektrodách vrstva opačných nábojů.

Díky svým vlastnostem, které se pohybují v rozmezí mezi klasickým kondenzátorem a baterií, nalezne superkapacitor uplatnění jako záloha energie v obnovitelných zdrojích (větrné, solární elektrárny) nebo v hybridních automobilech. Výhodou oproti bateriím je, že superkapacitor dokáže v krátkém čase dodat mnohem větší výkon.

Olověné baterie

Olověná baterie se skládá z elektrod na bázi olova a elektrolytu kyseliny sírové. Během vybíjení klesá obsah kyseliny sírové a tvoří se voda, naopak při nabíjení se její obsah zvyšuje. Koncentrace kyseliny sírové tedy odpovídá úrovni nabití baterie. Jmenovité napětí jednoho článku je 2 V. Nevýhodou těchto baterií je snižování kapacity při nedostatečném nabití, malá hustota energie a vyšší hmotnost.

Ni-Cd akumulátory

Nikl-kadmiové akumulátory mohou být v uzavřeném (se zaplavenými elektrodami) nebo hermetickém provedení. Záporná elektroda akumulátoru je z kadmia, kladná elektroda je z hydroxidu nikelnatého a práškového grafitu. Elektrolyt je hydroxid draselný. Výhodou oproti olověným bateriím je větší odolnost proti přebíjení, vyšší nabíjecí proudy, delší životnost a možnost skladování ve vybitém stavu. Nevýhodou je vyšší cena, nižší napětí článků, toxicita kadmia a paměťový efekt.

Lithium-Ion akumulátory

Anoda lithium-iontového akumulátoru je tvořena uhlíkem, katoda oxidem lithia a elektrolytem je rozpuštěná lithiová sůl. Struktura je podobná jako u Ni-Cd akumulátorů. Mezi výhody patří bezúdržbový provoz, vysoká hustota energie, malé samovybíjení, netrpí paměťovým efektem, vyšší jmenovité napětí. Nevýhodou je ztráta kapacity baterie v čase, vyšší cena, možnost výbuchu při špatném použití, např. přebíjení, nebo při mechanickém nárazu.

NaS baterie

Sodíko-sírové baterie se skládá z tekutého sodíku (anoda) a tekuté síry (katoda). Elektrolyt je keramický. Články jsou uzavřené v hermetických obalech a musejí odolávat vysokým teplotám a tlakům. Je to vysokoteplotní systém (300 °C – 350 °C). Sodík dosahuje vysoké hustoty energie na jednotku hmotnosti, což je velkou výhodou oproti například olověným akumulátorům (jsou cca 3x menší). Účinnost je kolem 90 %. Netrpí paměťovým efektem a samovybíjení je velmi malé. Nevýhodou je nemožnost manipulace nebo vibrací při provozu, protože roztavené látky uvnitř baterie musí být v klidu. [1, 2]

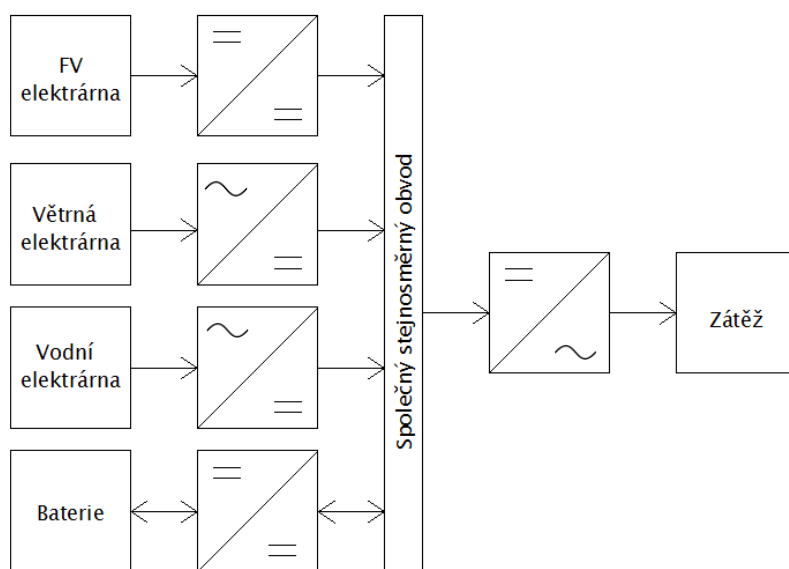
1.3 Topologie obnovitelných zdrojů s obousměrným přenosem energie

Největší nevýhodou obnovitelných zdrojů je jejich nestálá schopnost dodávat energii v čase. Proto musí docházet k akumulaci energie ve chvílích, kdy je energie dostatek či nadbytek (během dne u fotovoltaických elektráren, při dostatečné rychlosti větru větrných elektráren). Akumulace elektrické energie se provádí pomocí akumulátorových jednotek, které jsou vhodným způsobem připojeny do sítě s obnovitelnými zdroji energie. Požadavek na obousměrný přenos energie tedy nastává při nabíjení baterií (obnovitelné zdroje produkují dostatek energie) a následně při vybíjení baterie (obnovitelné zdroje nedodávají dostatek energie) je zátěž napájena baterií. Baterie je vždy připojena do společné sítě přes polovodičový měnič, který je schopen obousměrného toku energie. Je důležité zmínit, že následující topologie jsou univerzální a jejich provedení se liší v závislosti na konkrétní aplikaci. [1]

1.3.1 Topologie se společným stejnosměrným obvodem

Topologie zapojení obnovitelných zdrojů s akumulací energie a společným stejnosměrným obvodem je uvedena na obrázku 1.3. Obnovitelné zdroje energie jsou připojeny ke společnému stejnosměrnému obvodu pomocí měničů, které umožňují jednosměrný tok výkonu. K akumulaci energie vyrobené těmito obnovitelnými zdroji je zde použita baterie (může to být například i superkapacitor). Fotovoltaická elektrárna je připojena pomocí DC/DC měniče, který zvyšuje napětí ze solárních panelů na napětí společného obvodu. Vodní a větrná elektrárna jsou připojeny pomocí usměrňovačů. K přenosu energie mezi akumulacním systémem a společným stejnosměrným obvodem je využit reverzibilní DC/DC měnič. V době dostatku vyráběné energie (slunečný den, dostatečná rychlost větru) se baterie nabíjí. V opačném případě baterie poskytuje energii zátěži a reverzibilní DC/DC měnič pracuje s opačným tokem energie. K připojení střídavé zátěže slouží střídač. Naznačená konfigurace je univerzální a může být různě modifikována. Mohou být použity jen některé obnovitelné zdroje, popř. tyto zdroje mohou být doplněny generátorem nezávislým na přírodních podmínkách. Toto uspořádání s více zdroji energie se označuje jako hybridní systém.

[3, 11, 12]

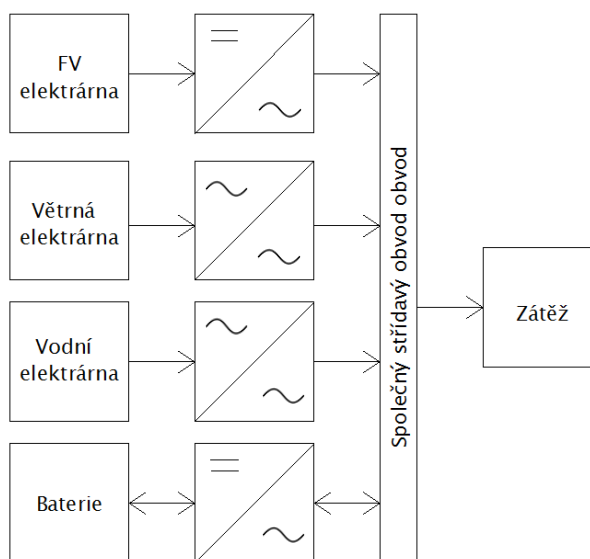


Obr. 1.3: Topologie s obousměrným přenosem energie a společným stejnosměrným obvodem

1.3.2 Topologie se společným střídavým obvodem

Hybridní systém se společným střídavým obvodem je na obrázku 1.4. Fotovoltaická elektrárna je ke společnému střídavému obvodu připojena pomocí střídače. Vodní a větrná elektrárna jsou připojeny střídavým měničem, popř. měničem frekvence. K přenosu energie do akumulčního systému (zde baterie) je třeba energii usměrnit, při opačném toku energie ji rozstřídat. Zátěž (zde jako střídavá) je přímo připojena ke společnému obvodu. Pokud by bylo třeba připojení stejnosměrné zátěže, musel by být použit usměrňovač mezi společným střídavým obvodem a stejnosměrnou zátěží. Uvedená hybridní konfigurace může být různě modifikována. Například lze využít pouze některé obnovitelné zdroje nebo různé akumulční systémy.

[11, 13, 14]

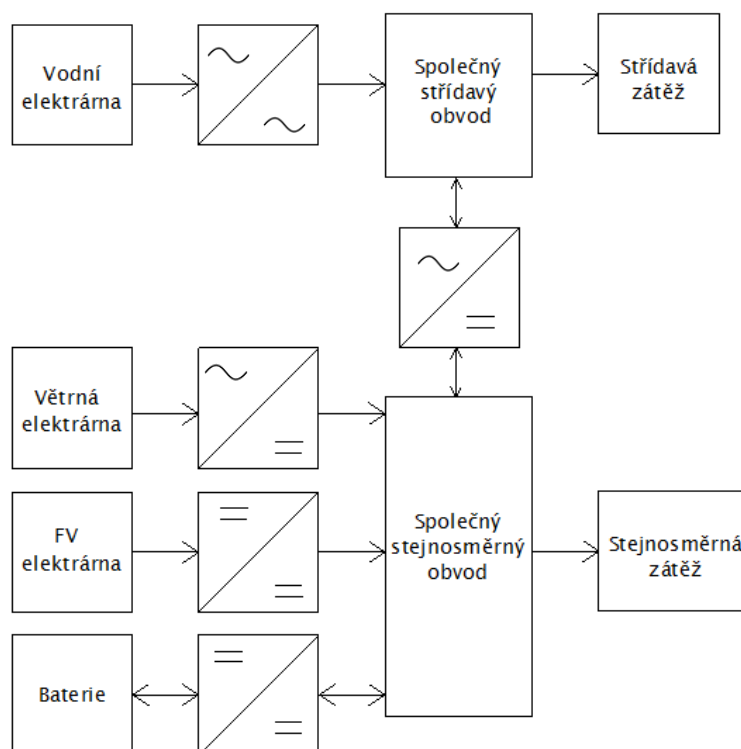


Obr. 1.4: Topologie s obousměrným přenosem energie a společným střídavým obvodem

1.3.3 Topologie se společným střídavým a stejnosměrným obvodem

Kombinací předchozích topologií vznikne zapojení se společným střídavým i stejnosměrným obvodem (Obr. 1.5). Vodní elektrárna je připojena ke střídavému obvodu pomocí střídavého měniče. Energie z větrné elektrárny je usměrněna do společného stejnosměrného obvodu, fotovoltaický panel je připojen ke stejnosměrnému obvodu pomocí zvyšujícího DC/DC měniče. Pro přenos energie mezi střídavou a stejnosměrnou částí obvodu slouží obousměrný AC/DC měnič. Baterie (či jiný akumulční systém) je zapojen do stejnosměrného meziobvodu pomocí reverzibilního DC/DC měniče. Stejně jako u předchozích topologií, i zde platí, že konfigurace může být libovolně upravitelná, zejména z hlediska využitých obnovitelných zdrojů.

[13, 14, 15]

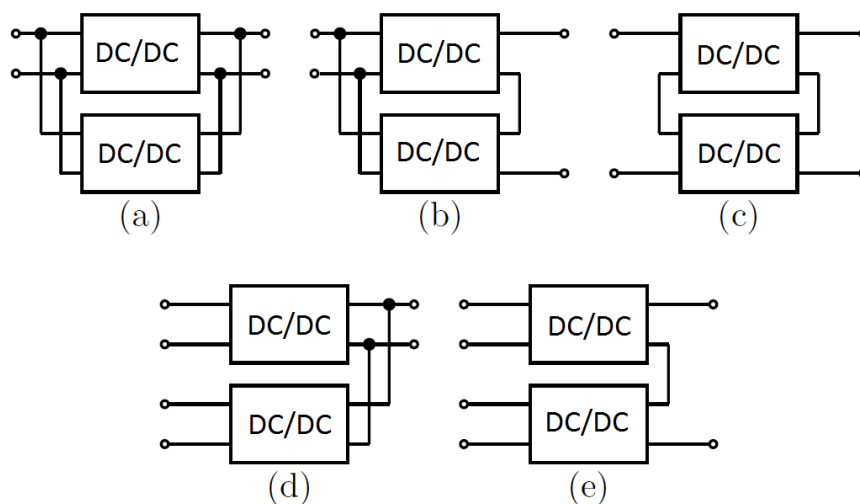


Obr. 1.5: Topologie s obousměrným přenosem energie a společným střídavým a stejnosměrným obvodem

1.3.4 Zapojení reverzibilních DC/DC měničů

Akumulační systém se může skládat z více částí, např. několika baterií. Existují konfigurace pro přenos energie mezi akumulacním systémem a společným obvodem s více reverzibilními DC/DC měniči. Těmito konfiguracemi se může ke společnému obvodu připojit více těchto akumulacních systémů. Na obrázku 1.6 je uvedeno několik konfigurací pro obousměrný přenos energie se dvěma reverzibilními DC/DC měniči. Konfigurace z obrázku 1.6a až 1.6c jsou určeny pro připojení jednoho akumulacního systému, zatímco konfigurace 1.6.d a 1.6.e jsou uzpůsobeny pro více akumulacních systémů. Na prvním zapojení (1.6a) reverzibilní DC/DC měniče sdílí vstupní i výstupní proudy. Tohle zapojení je označováno jako IPOP - Input Parallel Output Parallel (paralelní vstup, paralelní výstup). Proto je toto zapojení vhodné pro případy, kdy je třeba přenášet veliké hodnoty proudů v obou směrech. Řízením proudů každého měniče se řídí i přenášený výkon měničem. Odvozené zapojení této konfigurace je na 1.6d. Podobně jako u předchozího, velikost přenášeného výkonu odpovídá velikosti regulovaného proudu. Zapojení IPOS – Input Parallel Output Series (paralelní vstup, sériový výstup) (Obr. 1.6b) sdílí proud na vstupní straně a umožňuje dosáhnout vysokého napětí na sériové straně. Topologie je proto vhodná pro aplikace, kdy se pracuje s velkým napěťovým rozdílem mezi akumulacními systémy a zátěží. Pro rovnoměrné rozložení přenášeného výkonu mezi oba měniče je třeba, aby každý měnič měl vlastní napěťový regulátor. Z této topologie je odvozené zapojení na 1.7e. Pomocí tohoto odvozeného zapojení se může připojit několik akumulacních systémů dohromady a díky sériovému zapojení výstupu se dosáhne vyššího napětí. Konfigurace na obrázku 1.6c je označována jako ISOS – Input Series Output Series (sériový vstup, sériový výstup). Napětí na obou stranách zapojení je

sdílené, je tedy vhodné pro vysoké vstupní a výstupní napětí. Zapojení je zejména vhodné v případech, kdy přenášený výkon je velmi vysoký a díky vysokému napětí se přenáší menší proud. To má za následek menší ztráty. Je nezbytné provádět regulaci sdílení napětí mezi měniči, což zvyšuje složitost řízení. [16]



Obr. 1.6: Konfigurace zapojení se dvěma reverzibilními DC/DC měniči -
a) IPOP, b) IPOS, c) ISOS, d) upravené IPOP, e) upravené IPOS [16]

2 Topologie výkonových částí měničů pro obousměrný přenos energie mezi stejnosměrnými systémy

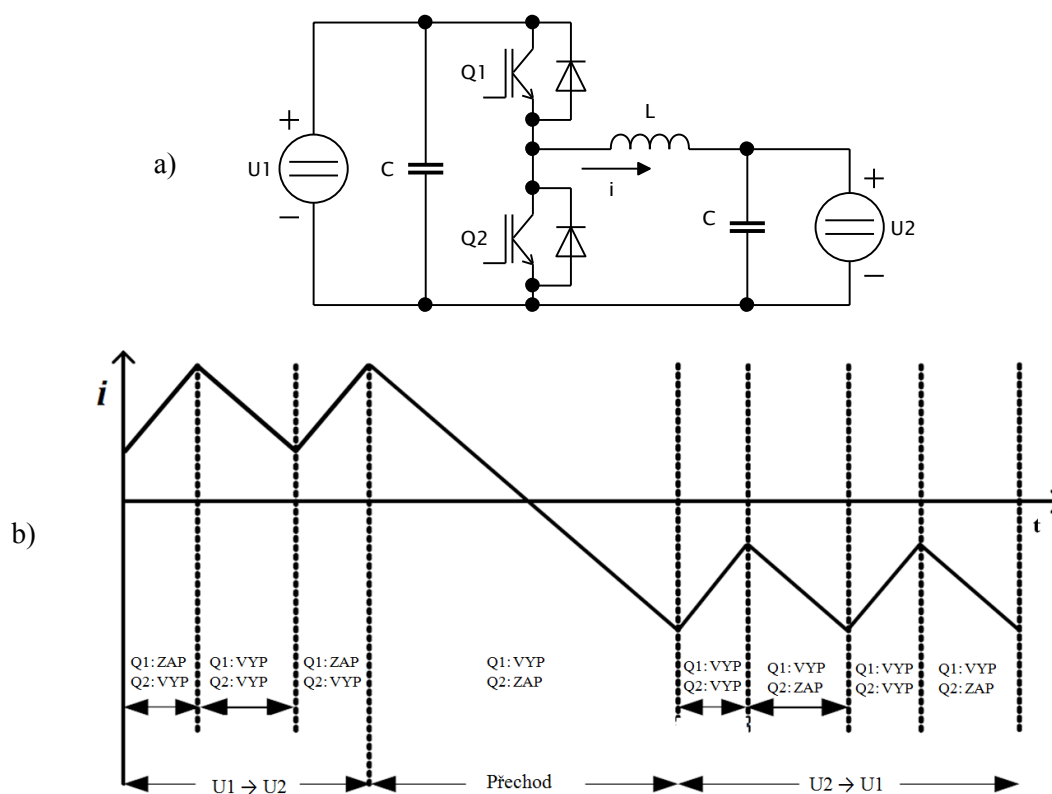
Reverzibilní DC-DC měniče nalézají své uplatnění v topologiích s obnovitelnými zdroji a např. také v hybridních automobilech. Reverzibilní DC-DC měniče se rozdělují do dvou skupin: měniče bez galvanického oddělení a s galvanickým oddělením. Měníče bez galvanického oddělení jsou jednodušší a mohou dosahovat lepší účinnosti. Avšak přítomnost galvanického oddělení je u mnoho aplikací vyžadována.

2.1 Měníče bez galvanického oddělení

Do této kategorie patří DC/DC měniče, které neobsahují impulzní transformátor pro galvanické oddělení.

2.1.1 Měnič s reverzací proudu

Toto základní zapojení reverzibilního měniče vzniklo kombinací snižujícího a zvyšujícího měniče – Obr. 2.1a. Napětí zdroje U_1 je vyšší než napětí zdroje U_2 . Při provozu měniče, kdy je energie převáděna ze strany s vyšším napětím na stranu s nižším napětím, je aktivní spínač Q_1 a spínač Q_2 je vypnutý. Při opačném toku energie, tedy ze strany s nižším napětím na stranu s vyšším napětím, je aktivní spínač Q_2 a spínač Q_1 zůstává vypnutý. Obrázek 2.1b ukazuje proud měniče pro oba režimy přenosu energie. Vlastností tohoto zapojení je, že měnič pracuje jako snižující při jednom směru toku energie a jako zvyšující při druhém směru toku energie. [17]



Obr. 2:1: Reverzibilní měnič bez galvanického oddělení s reverzací proudu –
a) schéma zapojení, b) průběh proudu měniče [17]

2.1.2 Měnič s reverzací proudu – zvyšující či snižující

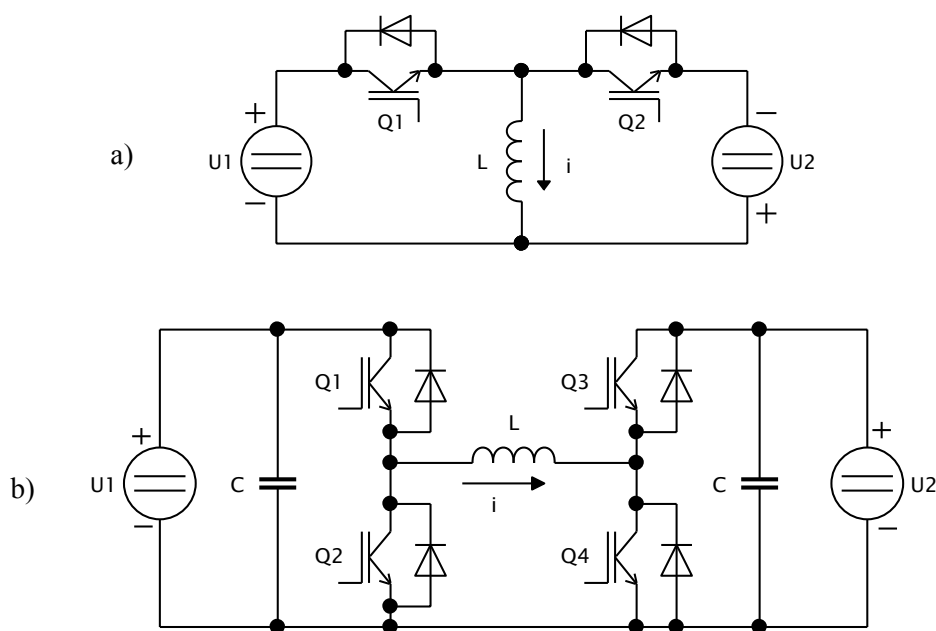
Tento měnič odstraňuje nevýhodu předchozího zapojení, je tedy jedno, který zdroj má vyšší napětí. Na obrázku 2.2a je zapojení založené na tzv. buck-boost měnič (buck-boost měniče mohou pracovat jak zvyšující tak snižující). Při přenášení energie ze zdroje U_1 do zdroje U_2 je spínán spínač Q_1 . Doba sepnutí spínače je

$$t_{zap} = z \cdot T \quad (2.1)$$

kde z je zatěžovatel a T je perioda. Zatěžovatelem se řídí velikost přenášené energie. Při sepnutém spínači Q_1 se indukčnost L nabíjí a při vypnutém spínači se pak vybíjí přes zdroj U_2 a zpětnou diodu spínače Q_2 . Vybíjení indukčnosti probíhá během doby, kdy je spínač vypnutý:

$$t_{vyp} = (1 - z) \cdot T \quad (2.2)$$

Při opačném směru toku energie je funkce obdobná, přičemž je spínán spínač Q_2 a Q_1 je ponechán vypnutý. Při zapnutém spínači Q_2 se nabíjí indukčnost (proudem opačného směru, než je naznačený na obrázku), během doby vypnutí se indukčnost vybíjí přes zpětnou diodu spínače Q_1 a zdroj U_1 . Polarita stejnosměrných zdrojů je však opačná vzhledem ke společné zemi, což je značná provozní nevýhoda. To je řešeno přidáním dvou spínačů a vzniká tak zapojení uvedené na obrázku 2.2b (je to v podstatě zdvojené zapojení z obrázku 2.1a). Uvedené zapojení pracuje obdobně jako zapojení na obrázku 2.1a. Při přenosu energie ze zdroje U_1 do zdroje U_2 jsou zároveň spínány spínače Q_1 a Q_4 s určitým zatěžovatelem (spínače Q_2 a Q_3 zůstávají vypnuté). Během doby sepnutých spínačů Q_1 a Q_4 se indukčnost nabíjí, při vypnutých spínačích se proud indukčnosti uzavírá přes zpětné diody tranzistorů Q_2 a Q_3 a přes zdroj U_2 . Při přenosu energie ze zdroje U_2 do zdroje U_1 jsou aktivní spínače Q_2 a Q_3 a spínače Q_1 a Q_4 jsou vypnuté. Během doby sepnutých spínačů se indukčnost nabíjí proudem opačného směru, než je naznačený na obrázku. Indukčnost se vybíjí během doby vypnutých spínačů přes zpětné diody spínačů Q_1 a Q_4 do zdroje U_1 . [17]

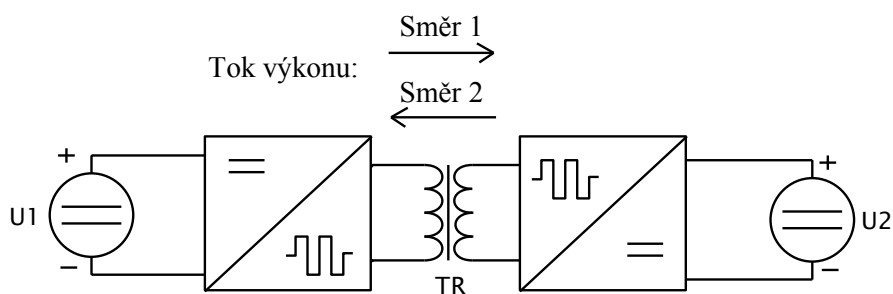


Obr. 2.2: Reverzibilní měnič bez galvanického oddělení s reverzací proudu (zvyšující či snižující) - a) typ buck-boost, b) typ buck-boost se čtyřmi spínači [17]

2.2 Měniče s galvanickým oddělením

Galvanické oddělení mezi jednotlivými systémy je častý požadavek mnoha obvodů. Důvody pro zavedení galvanického oddělení jsou osobní bezpečnost, zlepšení EMC a správná funkce ochranných systémů. Galvanické oddělení měničů je řešeno pomocí transformátoru. Je tedy nutné, aby součástí měniče byl střídavý obvod pro přenos energie pomocí transformátoru.

Blokové schéma základní struktury reverzibilního DC/DC měniče s galvanickým oddělením je na obrázku 2.3. Měnič se skládá ze dvou střídačů a vysokofrekvenčního transformátoru, který slouží ke galvanickému oddělení a nastavení poměrů napětí mezi zdroji. Protože je požadován obousměrný tok energie měničem, musí být střídače schopné obousměrného přenosu energie. Také zdroje na obou koncích měniče U_1 a U_2 musí být schopné jak dodat, tak přijmout energii.



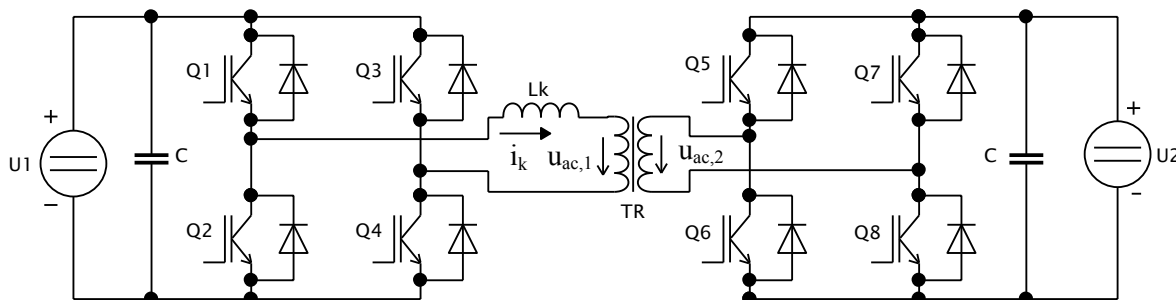
Obr. 2.3: Základní struktura reverzibilního DC-DC měniče s galvanickým oddělením

Oba DC/AC měniče, ze kterých se reverzibilní měnič skládá, mohou být proudového nebo napětového typu. Proudový měnič má na vstupu indukčnost, která se chová jako proudový zdroj. Napětový měnič má na vstupu kondenzátor, který se chová jako napětový zdroj. Funkce a spínací technika těchto měničů jsou odlišné.

Obousměrná funkce měniče vyžaduje v obou DC/AC měničích přítomnost řízených spínačů. Proto mohou být oba měniče aktivně řízeny v obou funkčních režimech (v obou směrech toku energie). Avšak některé reverzibilní měniče využívají řízení spínačů na zdrojové straně měniče a neřízených spínačů (diod) na straně druhé pro usměrnění proudu. Toto zmenšuje náročnost řízení měniče, na druhou stranu ale není naplno využito schopností struktury. V poslední době se využívá řízení obou měničů bez ohledu na to, jakým směrem energie teče. [17, 18]

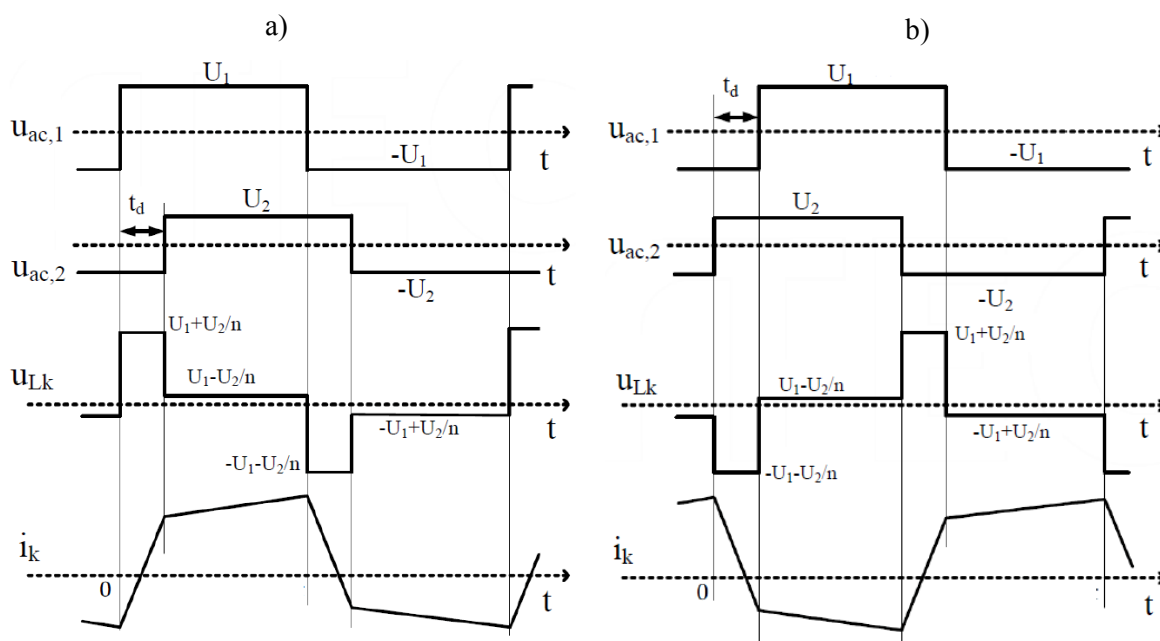
2.2.1 Dvojitý aktivní můstek

Dvojitý aktivní můstek je tvořen dvěma měniči napětového typu. Řízení měniče je založeno na strategii fázového posuvu. Spínače můstku jsou spínány tak, aby bylo vytvořeno obdélníkové napětí. Tedy diagonální dvojice spínačů je zároveň spínána, přičemž zatěžovatel je 50%. Druhá dvojice spínačů je spínána se zpožděním 180° . Důležitým parametrem je časový posuv spínání t_d . Je to časový posuv mezi střídavými obdélníkovými průběhy napětí, které jsou přiváděny na vstupy transformátoru z obou měničů. Tento posuv určuje směr a velikost energie, která se přenáší mezi zdrojovými systémy reverzibilního měniče.



Obr. 2.4: Dvojité aktivní můstek

L_k je rozptylová indukčnost transformátoru, n je převod transformátoru (strana U_2 ku straně U_1). K převodu energie ze strany U_1 na stranu U_2 musí střídavé napětí na transformátoru $u_{ac,1}$ přebíhat napětí $u_{ac,2}$, tedy časový posun t_d je kladný. Při směru toku výkonu ze strany U_2 na stranu U_1 se napětí $u_{ac,1}$ opoždí za napětím $u_{ac,2}$ a časový posun t_d je záporný. Indukčnost L_k je důležitý parametr, který určuje maximální velikost přenášeného výkonu měničem. Průběhy jednotlivých napětí a proudů při obou směrech přenosu výkonu jsou uvedeny na obrázku 2.5.


 Obr. 2.5: Průběhy napětí a proudů dvojitého aktivního můstku -
 a) přenos energie $U_1 \rightarrow U_2$, b) přenos energie $U_2 \rightarrow U_1$ [17]

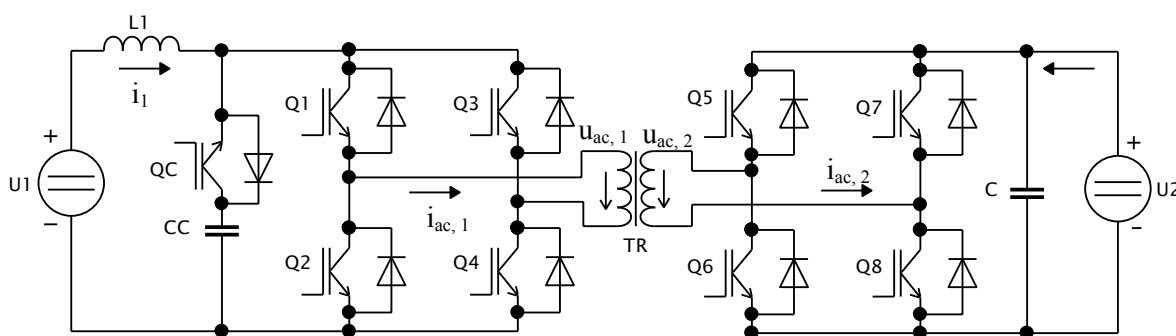
Některé z výhod tohoto měniče jsou následující: oba střídače v měniči tvoří střídavý průběh napětí s amplitudou téměř rovnou vstupnímu stejnosměrnému napětí, proto napěťové namáhání každého spínače je limitováno hodnotou vstupního napětí, proudové namáhání všechny spínačů na každé straně je shodné, mohou se použít metody řízení se střední nebo maximální hodnotou proudu.

Mezi nevýhody patří, že proud tekoucí na stejnosměrných stranách má velké zvlnění, proto se musí použít vhodné filtrační obvody, řízení je velmi citlivé na malé změny časového posuvu t_d , zvláště v případě vysokých vstupních napětí; proto jsou nutné velmi přesné časovače

posuvu t_d . Realizace zapojení je velmi citlivá na provedení transformátoru s ohledem na jeho rozptylovou indukčnost, což bývá velmi kritické. [17, 18]

2.2.2 Dvojitý aktivní můstek proudového typu

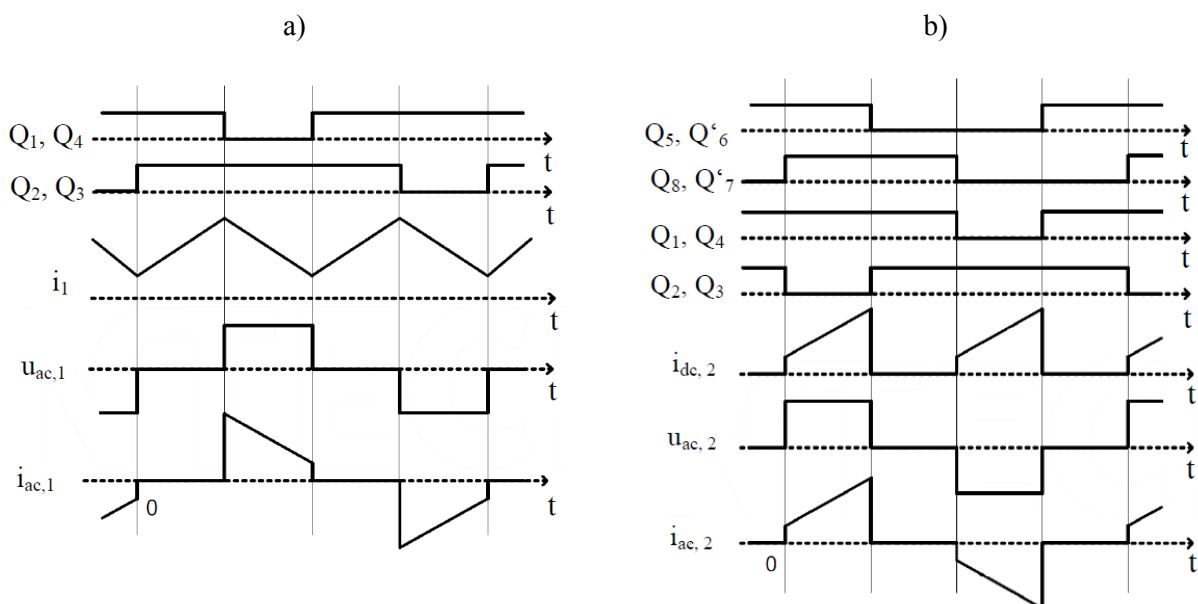
Další podobná konfigurace reverzibilního DC/DC měniče je na obrázku 2.6. Strana zdroje U_1 je tvořena můstkem proudového typu a strana zdroje U_2 můstkem napěťového typu. Spínač Q_C a kondenzátor C_C slouží k omezení špiček způsobených rozptylovou indukčností transformátoru během komutace proudu.



Obr. 2.6: Dvojitý aktivní můstek

Na obrázku 2.7a jsou idealizované průběhy pro režim přenosu energie ze strany zdroje U_1 na stranu zdroje U_2 . Zapojení funguje jako zvyšující měnič, proto napětí na výstupní straně musí být vyšší jak na vstupní straně pro správný chod měniče. Spínače Q_1 , Q_4 a Q_2 , Q_3 jsou spínány se zatěžovatelem větším jak 0,5. Z toho vyplývá, že časy sepnutých spínačů se budou překrývat, jak je naznačeno na průbězích. Vstupní tlumivka L_1 se nabíjí během intervalu, kdy jsou sepnuty všechny čtyři spínače a vybíjí se ve chvíli, kdy je sepnuta jen jedna z dvojic spínačů Q_1 , Q_4 a Q_2 , Q_3 . Velikost přenášené energie se dá řídit změnou doby, po kterou jsou řídicí signály dvojic spínačů Q_1 , Q_4 a Q_2 , Q_3 překruty.

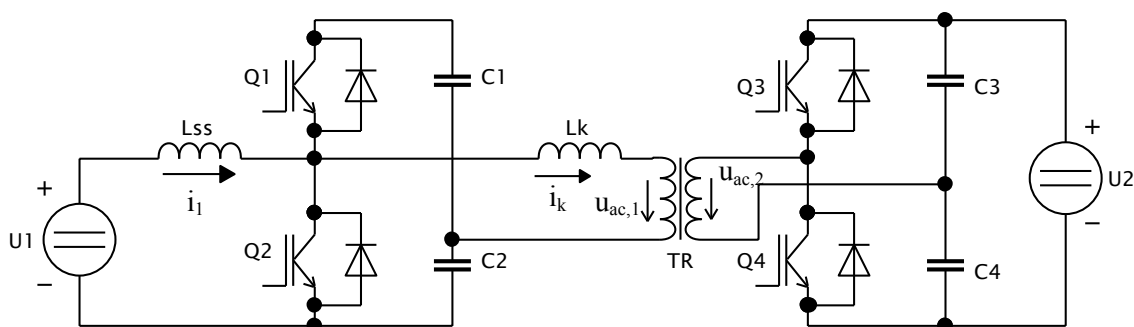
Při přenosu energie ze zdroje U_2 do zdroje U_1 je aktivní měnič napěťového typu. Využívá se zde řízení velikosti přenášené energie pomocí časového posuvu mezi spínáním spínačů napěťového a proudového měniče. Spínač Q_C pomáhá k dosažení ZCS (Zero Current Switching – spínání v nulové hodnotě proudu) pro jednu z dvojic spínačů v napěťovém můstku. [17]



Obr. 2.7: Průběhy napětí a proudů dvojitého aktivního můstku proudového typu -
a) přenos energie $U1 \rightarrow U2$, b) přenos energie $U2 \rightarrow U1$ [17]

2.2.3 Dvojitý polomůstek

Zapojení se skládá z polomůstku proudového typu na jedné straně a z polomůstku napěťového typu na straně druhé, kde je obvykle vyšší napětí. Proudová strana měniče má menší napětí, protože obvykle obsahuje stejnosměrné zdroje jako je baterie nebo superkapacitor, u kterých je třeba proudu s malým zvlněním (zapojení se používá např. v hybridních automobilech). Podobně jako u dvojitého aktivního můstku (obr. 2.4) se řízení toku energie provádí pomocí časového posuvu mezi napěťovými průběhy přiváděnými na transformátor.



Obr. 2.8: Dvojitý polomůstek

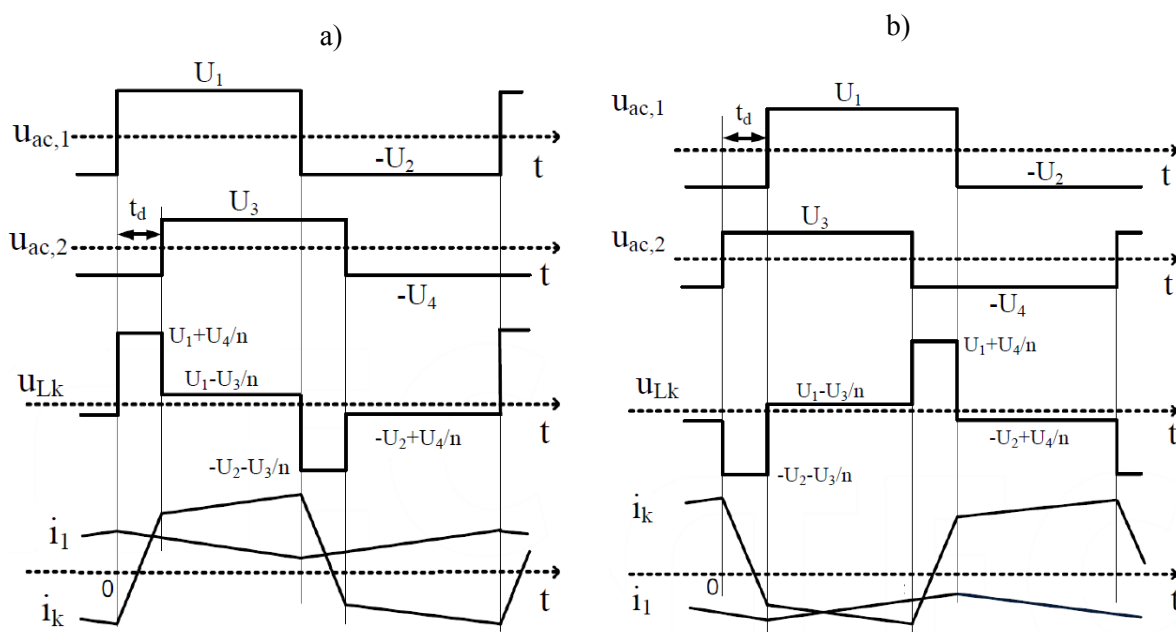
Při přenosu energie ze zdroje $U1$ do zdroje $U2$ pracují spínače $Q1$ a $Q2$ jako zvyšující měnič a zároveň slouží k rozstředání napětí, které jde na primární vinutí transformátoru. Spínače $Q3$ a $Q4$ usměrňují střídavý proud z transformátoru. Tyto spínače nejsou spínány tak, aby se chovaly pouze jako diody pro usměrnění, ale spínají se tak, aby obdélníkové napětí na sekundární straně transformátoru mělo požadovaný časový posuv vzhledem k napětí na primární straně.

Při přenosu energie ze zdroje U_2 do zdroje U_1 se spínače spínají tak, aby se jednoduše vstupní stejnosměrné napětí zdroje U_2 rozstřídalo na obdélníkové pulzy přiváděné na vinutí transformátoru. Spínače Q_1 a Q_2 spínají tak, aby se usměrnil střídavý proud z transformátoru.

Průběhy jednotlivých proudů a napětí měniče pro oba směry přenosu energie jsou uvedeny na obrázku 2.9. Při režimu $U_1 \rightarrow U_2$ obdélníkové napětí na primárním vinutí transformátoru předbíhá obdélníkové napětí na sekundárním vinutí, časový posuv t_d je tedy kladný a proud tekoucí tlumivkou L_{ss} je také kladný. Při režimu $U_2 \rightarrow U_1$ se naopak obdélníkové napětí na primární straně transformátoru opožďuje za napětím na sekundární straně, časový posuv t_d a proud tlumivkou i_l jsou tedy záporné.

Maximální hodnota přenášeného výkonu nastává při časovém posuvu $t_d = T/4$. Řízení měniče v celém rozsahu tedy probíhá změnou časového posuvu od $-T/4$ do $+T/4$. Pro zvýšení účinnosti měniče se musí snížit přenos jalového výkonu přes transformátor. Větší jalový výkon má za následek vyšší proud a s tím spojené vyšší ztráty. Větší fázový posun způsobuje větší jalový výkon. K omezení jalového výkonu se musí navrhnout měnič s nižší sériovou indukčností L_k , pak se požadovaného přenášeného výkonu dosáhne při nižších fázových posuvech.

Všechny spínače v měniči pracují v režimu spínání v nule napětí (ZVS – Zero Voltage Switching). Mezi hlavní výhody tohoto měniče patří: menší počet spínačů (oproti můstkům), jednoduché řízení měniče založené na fázovém posuvu a malé zvlnění proudu na proudové straně měniče (zdroj U_1). Nevýhodou je velké zvlnění proudu oddělovacích kondenzátorů. [17, 18]



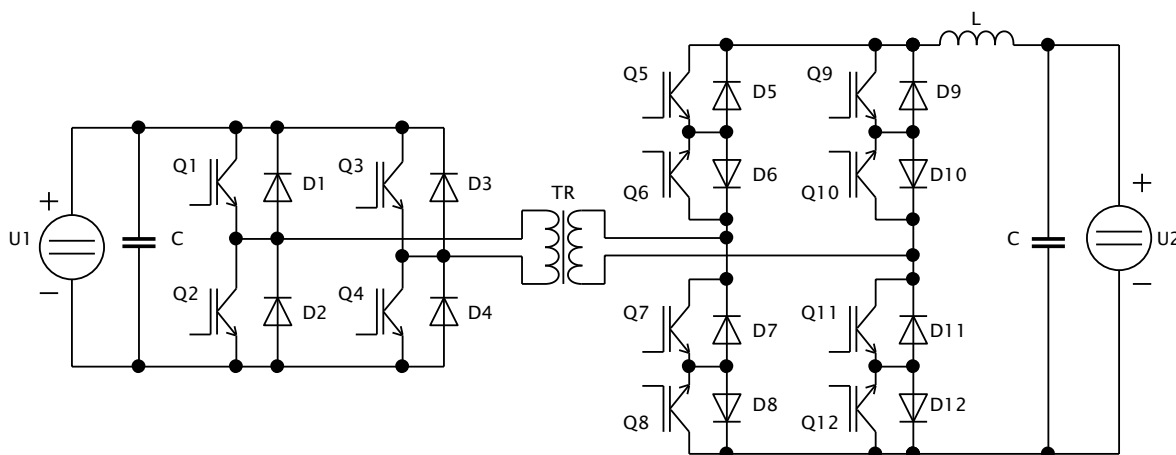
Obr. 2.9: Průběhy napětí a proudů dvojitého aktivního polomůstku -
a) přenos energie $U_1 \rightarrow U_2$, b) přenos energie $U_2 \rightarrow U_1$ [17]

3 Konkrétní řešení vybrané topologie měniče

Zvolená topologie měniče vychází z již známých zapojení reverzibilních měničů (některé jsou popsány ve 2. kapitole práce). Je zvolena možnost s galvanickým oddělením pomocí transformátoru, jedna část měniče má napěťový a druhá část proudový charakter. Proudová část měniče obsahuje tlumivku, která zmenšuje zvlnění proudu. Proto je zapojení vhodné pro akumulátorové aplikace. V této kapitole je popsáno zapojení měniče a jeho funkce. Dále je uveden výběr jednotlivých komponentů pro realizaci a je provedeno dimenzování chlazení, transformátoru a dalších prvků.

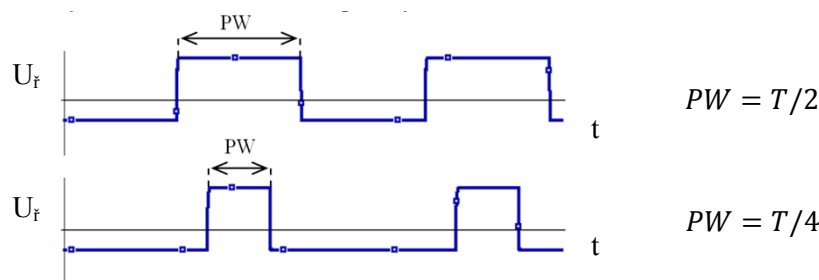
3.1 Popis zapojení a funkce

Schéma reverzibilního měniče naznačené na obrázku 3.1 se skládá z H-můstku (jednofázový střídač, má napěťový charakter a dále je označován jako napěťový měnič), maticového měniče (proudový charakter, dále je označován jako proudový měnič), impulzního transformátoru a vyhlazovacích kondenzátorů a tlumivky. Požadavkem maticového měniče jsou spínače, které jsou při vypnutém stavu obousměrně nevodivé a v sepnutém stavu obousměrně vodivé. Toho se dá dosáhnout antisériově zapojenými tranzistory s diodami – viz. schéma. Diody zabráňují toku proudu v opačném směru. Například při zapnutí tranzistoru Q10 proud teče přes tento tranzistor a diodu D9. Dioda D9 pak zabráňuje toku proudu v opačném směru, když se nespíná tranzistor Q10. Impulzní transformátor sloužící ke galvanickému oddělení má převod 1:1.



Obr. 3.1: Schéma zapojení reverzibilního DC/DC měniče

Funkce měniče může probíhat ve dvou režimech – přenos energie ze zdroje U_1 do zdroje U_2 nebo naopak. Vždy jeden ze dvou měničů (napěťový/proudový) je aktivní (ze stejnosměrného napětí tvoří střídavé obdélníkové napětí) a druhý měnič usměrňuje energii, která je přenesena přes impulzní transformátor. Velikost přenášené energie se řídí šířkou pulzu, který se přivádí na primární vinutí transformátoru. Maximální šířka pulzu může být polovina periody spínání, tedy $T/2$ (při neuvažování krátkých ochranných dob). Příklad řídicích pulzů tranzistorů pro různé šířky pulzu ($T/2$ a $T/4$) jsou na obrázku 3.2. Šířka pulzu je označována PW (Pulse Width).



Obr. 3.2: Průběhy řídicího napětí tranzistorů pro šířky pulzu $PW = T/2$ a $PW = T/4$

Popis funkce při směru toku energie ze zdroje U1 do zdroje U2

Měnič při směru toku energie ze zdroje U1 do zdroje U2 (viz. obrázek 3.1) pracuje následovně: napěťový střídač vytváří obdélníkové pulzy spínáním střídavě dvojic tranzistorů Q1, Q4 a Q2, Q3. Mezi spínáním těchto kombinací musí být tzv. ochranná doba, aby nedošlo k současnému sepnutí tranzistorů v jedné větvi a tím následnému zkratu zdroje. Šířka obdélníkových pulzů se mění v závislosti na požadované velikosti přenášené energie. Impulzní transformátor přenesení obdélníkový napěťový pulz, přičemž musí být spínány vhodné kombinace tranzistorů z proudového měniče, aby se proud usměrnil. Při kladné polaritě obdélníkového pulzu na transformátoru jsou sepnuty tranzistory Q1, Q4. Ve stejný okamžik jsou sepnuty tranzistory Q6 a Q12 v proudovém měniči. V napěťovém měniči tedy při kladném pulzu na transformátoru teče proud přes zdroj, Q1, vinutí transformátoru a Q4. V proudovém měniči proud teče přes zdroj, Q12, D11, vinutí transformátoru, Q6, D5 a tlumivku. Při záporném pulzu na transformátoru teče proud v napěťovém měniči přes zdroj, Q3, vinutí transformátoru a Q2. V proudovém měniči proud teče přes zdroj, Q8, D7, vinutí transformátoru, Q10, D9 a tlumivku. Proudový měnič obsahuje tlumivku, která je nabita určitou energií. Proto nemůže být proudový měnič spínán stejně jako napěťový měnič, ale tak, aby byla vždy otevřena cesta pro procházející proud přes tlumivku a tranzistory proudového měniče. Spínání dvojic tranzistorů Q6, Q12 a Q8, Q10 tedy probíhá tak, aby se doby sepnutí těchto dvojic překrývaly (rozdíl oproti napěťovému měniči).

Popis funkce při směru toku energie ze zdroje U2 do zdroje U1

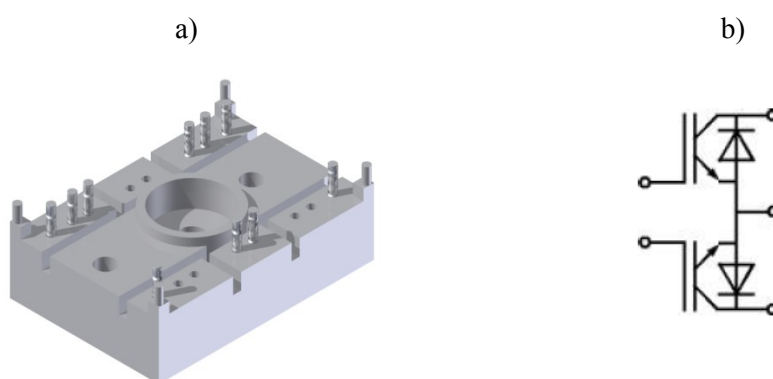
Při směru toku energie ze zdroje U2 do zdroje U1 je aktivní proudový měnič, který vytváří obdélníkové pulzy. Po přenesení energie transformátorem je na straně napěťového měniče energie usměrněna přes diody. Při kladném pulzu na vinutí transformátoru je sepnuta dvojice spínačů Q5, Q11. Při záporném pulzu je sepnuta dvojice Q9, Q7. Při kladném pulzu se tedy proud v proudovém měniči uzavírá přes zdroj, tlumivku, Q5, D6, vinutí transformátoru, Q11, a D12. V napěťovém měniči se při kladném pulzu uzavírá přes zdroj, D4, vinutí transformátoru a D1. Během záporného pulzu se proud proudového měniče uzavírá přes zdroj, tlumivku, Q9, D10, vinutí transformátoru, Q7 a D8. V napěťovém měniči se pak proud uzavírá přes zdroj, D2, vinutí transformátoru a D3. Stejně jako v režimu toku energie ze zdroje U1 do zdroje U2 se nesmí v žádném momentu uzavřít cesta pro procházející proud tlumivkou. Proto se doby spínání dvojic tranzistorů Q5, Q11 a Q9, Q7 překrývají.

3.2 Výběr součástek a dimenzování

V této podkapitole je provedeno dimenzování prvků a výběr jednotlivých součástí měniče, které jsou nezbytné pro realizaci, jako jsou tranzistorové moduly, budiče, impulzní transformátor, tlumivka, vyhlazovací kondenzátory a chlazení.

3.2.1 Tranzistory

Při návrhu měniče se uvažuje s maximálním napětím na vstupech 100 V a proudem 10 A. Maticový měnič obsahuje čtyři obousměrné spínače, které jsou tvořeny dvěma antisériově zapojenými tranzistory s příslušnými zpětnými diodami. Pro tyto požadavky byl vybrán tranzistorový modul od firmy SEMIKRON s označením SK60GM123. 3D model pouzdra tranzistorového modulu SEMITOP 2 a vnitřní zapojení modulu jsou zobrazeny na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Tranzistorový modul SEMIKRON SK60GM123 -

a) 3D model pouzdra SEMITOP 2, b) Zapojení tranzistorů v modulu [19]

Tranzistorový modul SK60GM123 je použit i v napěťové části měniče. Tato část měniče se skládá pouze ze čtyř tranzistorů a čtyř zpětných diod (jednofázový střídač), proto při použití tohoto modulu bude zapojen vždy jeden ze dvou tranzistorů ve struktuře. Přehled vybraných parametrů tranzistorového modulu je uveden v následující tabulce.

Tab. 3.1: Vybrané parametry tranzistorového modulu SK60GM123 [19]

Zkratka	Význam	Hodnota	Jednotka
U_{CEM}	max. napětí mezi kolektorem - emitorem	1200	V
I_{CM}	max. proud kolektorem	60	A
I_{FM}	max. proud zpětnou diodou	60	A

3.2.2 Budiče

Při vybírání vhodných budicích obvodů měniče se vychází z několika požadavků. Budič musí mít galvanické oddělení mezi řídicí (mikroprocesor) a výkonovou částí (hradlo tranzistoru), galvanické oddělení napájení budiče, výkon pro dodání dostatečného proudového náboje v určitém čase a musí být dostatečně rychlý pro zvolenou aplikaci. Moderní budiče poskytují také nadproudovou a zkratovou ochranu tranzistoru.

Pro buzení IGBT tranzistorů měniče byly vybrány budiče od firmy CONCEPT s označením 6SD106EI. Tento budič obsahuje 6 kanálů, pro celý měnič jsou použity dva tyto budiče (celkem 12 spínaných tranzistorů). Na obrázku 3.4 je uvedeno blokové schéma dvou kanálů budiče. Funkce jednotlivých bloků je následující:

LDI (Logic-to-Driver Interface)

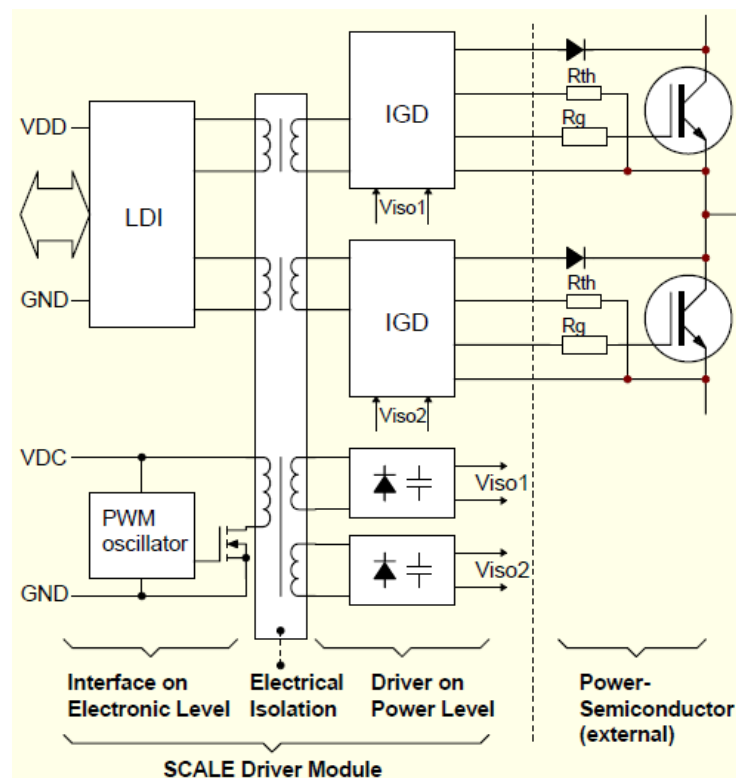
Rozhraní mezi řídicí elektronikou a budičem s následujícími vlastnostmi: tvoření tzv. ochranných dob (funkce se dá vypnout), tvarování pulzů, signalizace chyb, Schmittův klopný obvod.

IGD (Intelligent Gate Driver)

Výkonová část budiče, která má následující funkce: zesílení PWM signálů přenesené přes pulzní transformátor, zkratová a nadproudová ochrana, podnapěťová ochrana, generování blokujících časů.

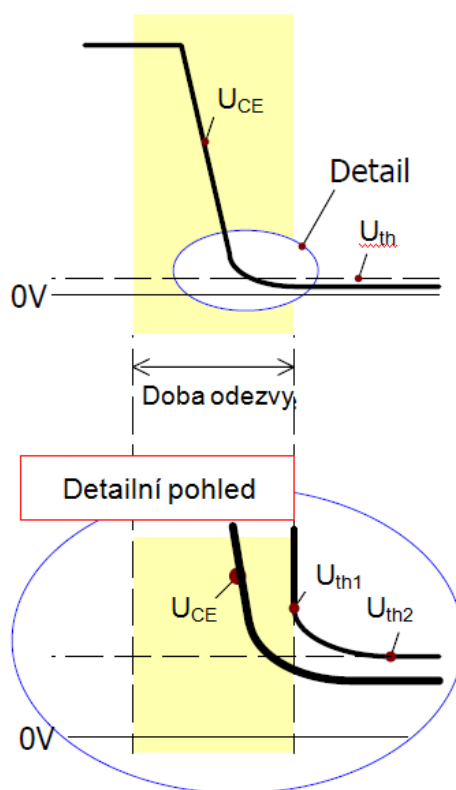
Integrovaný DC/DC měnič

Slouží k napájení vlastního budiče. Skládá se z PWM oscilátoru, impulzního transformátoru (galvanické oddělení) a usměrňovače.



Obr. 3.4: Blokové schéma dvou kanálů budiče CONCEPT 6SD106EI [20]

Externí rezistor R_g slouží k nastavení rychlosti spínání tranzistoru a rezistor R_{th} k nastavení nadproudové ochrany tranzistoru.



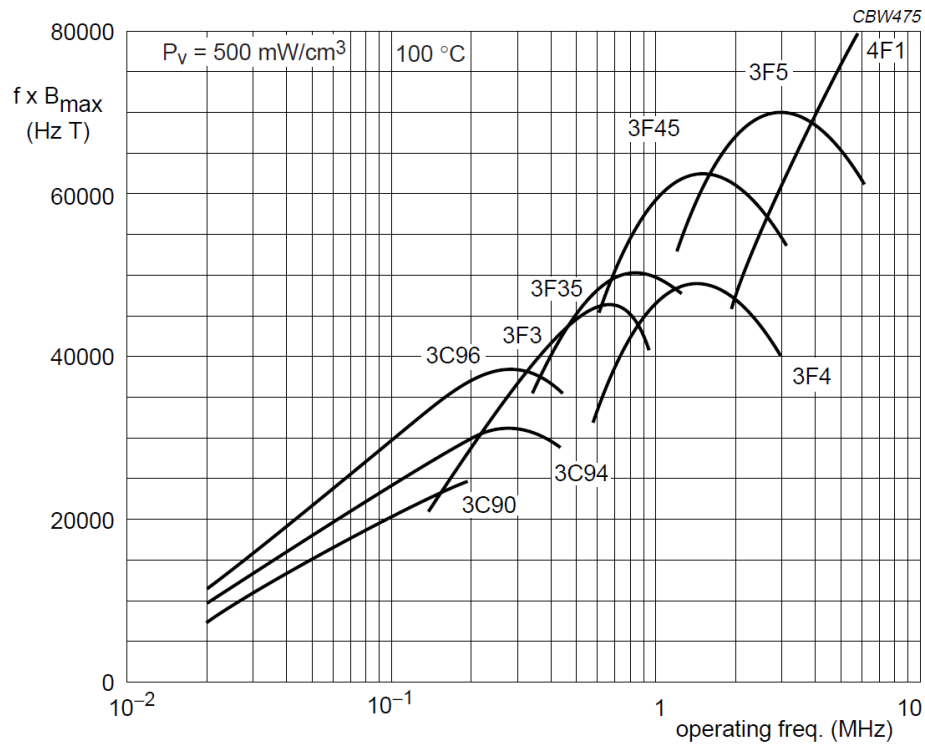
Obr. 3.5: Princip nadproudové ochrany [20]

Princip nadproudové ochrany je naznačen na obrázku 3.5. Budič měří napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru v sepnutém stavu. Se zvyšujícím proudem tranzistoru se zvyšuje i napětí mezi kolektorem a emitorem. Pokud procházející proud způsobí zvýšení napětí tranzistoru nad nastavenou úroveň, ochrana zareaguje a vypne tranzistor. Napěťová úroveň, při které ochrana reaguje, se nastavuje pomocí rezistoru R_{th} (viz. schéma na obrázku 3.4). Hodnota tohoto rezistoru určuje hodnotu mezních napětí U_{th1} , U_{th2} a dobu odezvy. Napětí U_{th1} je hodnota mezního napětí přesně po uplynutí doby odezvy. Napětí U_{th2} je napětí, které je statické po dobu otevření tranzistoru. Jak lze vidět na detailu obrázku 3.5, napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru U_{CE} je pod hodnotami mezních napětí. Pokud by napětí U_{CE} přesáhlo mezní napětí U_{th} , ochrana by zareagovala. Pro ochranu kolektorového výstupu budiče před vysokým napětím kolektoru vypnutého tranzistoru je obvod opatřen diodami.

Samotné budiče 6SD106EI potřebují pro svou činnost několik pomocných obvodů. Je tedy třeba desky plošných spojů, kde jsou tyto obvody navrženy. V našem měniči se využijí tyto DPS již zkonstruované na Katedře elektroniky. Desky obsahují rezistory R_{th} , R_g a diody na straně výstupů a další obvody na straně vstupů budičů 6SD106EI. Vstupní obvody zajišťují přizpůsobení vstupního signálu (ochrana proti zarušení vstupního signálu) a povolení/zakázání vstupů. [20, 21]

3.2.3 Transformátor

Při návrhu transformátoru pro reverzibilní DC/DC měnič se vychází z výkonu měniče, vstupního napětí a spínací frekvence. Nejprve je nutno vybrat materiál feritového jádra transformátoru, poté určit konkrétní typ jádra a nakonec počet závitů a průřez vodiče. Jádro bylo vybráno od výrobce Ferroxcube. Výrobce uvádí vhodnost použití jednotlivých materiálů jader dle provozní frekvence měniče. Pro náš konkrétní případ (20 – 50 kHz) je doporučen materiál 3C90, u kterého může být maximální provozní frekvence cca 200 kHz (obrázek 3.6).



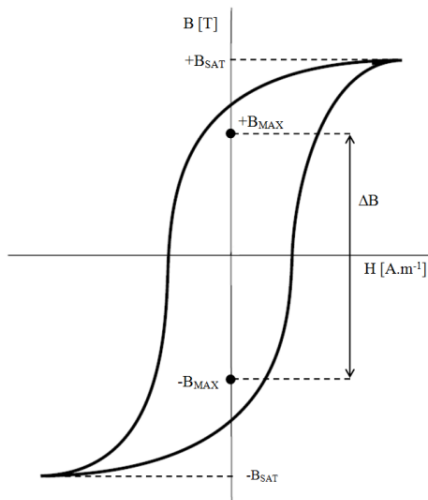
Obr. 3.6: Závislost výkonového činitele ($f \times B_{max}$) materiálů na pracovní frekvenci [24]

Jelikož obě části měniče (napěťová a proudová) jsou typu můstku (na vinutí transformátoru jsou obdélníkové pulzy kladné i záporné polarity), při návrhu transformátoru se uvažuje plná hysterezní křivka (Obr. 3.7) Výrobce uvádí hodnotu magnetické indukce B_{SAT} , při které dochází k nasycení jádra transformátoru. Během funkce měniče nesmí k nasycení dojít. Proto se musí určit hodnota magnetické indukce B_{MAX} , pro kterou bude platit:

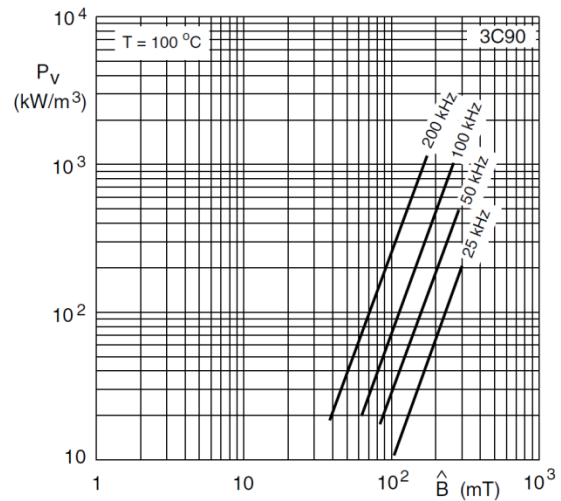
$$|B_{MAX}| < |B_{SAT}| \quad (3.1)$$

Hodnota zdvihu magnetické indukce ΔB je rovna:

$$\Delta B = 2 \cdot |B_{MAX}| \quad (3.2)$$



Obr. 3.7: Hysterezní křivka jádra [24]



Obr. 3.8: Závislost ztrát jádra na špičkové hodnotě magnetické indukce pro různé frekvence [23]

Hodnota zvolené magnetické indukce souvisí s frekvencí a ztrátami jádra (viz. Obr. 3.8). Pro náš konkrétní případ (20 – 50 kHz) je zvolena hodnota maximální magnetické indukce 200 mT. Zdvih magnetické indukce ΔB tedy bude 400 mT.

Při určení počtu závitů transformátoru se musí počítat i s maximální šířkou pulzu obdélníkového průběhu napětí (vzhledem k vyvarování se nasycení jádra). Maximální doba trvání pulzu se určí z minimální frekvence spínání s uvažováním maximální plné šířky pulzu. Při minimální frekvenci 20 kHz bude maximální doba zapnutí tranzistoru, a také šířka obdélníkového pulzu na vinutí transformátoru, následující:

$$t_{ZAP} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{20000} = 25 \mu s \quad (3.3)$$

Velikost jádra musí odpovídat velikosti přenášeného výkonu a můžeme ji zvolit na základě efektivní průřezu jádra a průřezu (rozlohy) vinutí. Součin těchto dvou veličin se označuje AP (Area Product). Dá se také vypočítat:

$$AP = \left(\frac{11,1 \cdot P}{K \cdot \Delta B \cdot f} \right)^{1,143} \quad (3.4)$$

Činitel K určuje využití vinutí transformátoru. Jeho hodnota se liší pro různé typy měničů. V našem případě je $K = 0,2$. Hodnota AP pak bude:

$$AP = \left(\frac{11,1 \cdot 1000}{0,2 \cdot 0,4 \cdot 20000} \right)^{1,143} = 9,15 \text{ cm}^4 \quad (3.5)$$

Zvolené jádro musí mít hodnotu AP větší než je vypočítaná hodnota. Tomu odpovídá jádro E65/32/27, které má dle datasheetu hodnotu $AP = 21,3 \text{ cm}^4$.

Počet primárních závitů se pak určí dle vztahu

$$N_p = \frac{U_{min} \cdot t_{on}}{\Delta B \cdot A_m} = \frac{50 \cdot 25}{0,4 \cdot 530} = 5,9 \cong 6 \text{ závitů} \quad (3.6)$$

kde U_{min} je minimální vstupní napětí a A_m je minimální průřez jádra. Po zaokrouhlení hodnoty bude počet závitů 6. Počet závitů sekundárního vinutí transformátoru je stejný jako počet závitů primárního vinutí, protože převod transformátoru je 1:1.

Indukčnost vinutí se rovná:

$$L = N^2 \cdot A_L = 6^2 \cdot (8600 \cdot 10^{-9}) = 0,31 \text{ mH} \quad (3.7)$$

kde A_L je koeficient indukčnosti jádra E65/32/27. Při uvažování nárůstu proudu vinutím se strmostí

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} \quad (3.8)$$

lze zjednodušeně určit hodnotu maximálního proudu při maximálním vstupním napětí 100 V a spínací frekvencí 20 kHz:

$$I_M = \frac{U \cdot t_{on}}{L} = \frac{100 \cdot (25 \cdot 10^{-6})}{0,00031} = 8,1 \text{ A} \quad (3.9)$$

Pro výpočet průřezu vodiče nejprve zvolíme proudovou hustotu $J = 3 \text{ A/mm}^2$. Průřez pak bude:

$$S = \frac{I}{J} = \frac{8,1}{3} = 2,7 \text{ mm}^2 \quad (3.10)$$

[4, 5, 6, 7, 8, 22, 23, 24]

3.2.4 Tlumivka a kondenzátory

Při návrhu tlumivky na vstupu maticového měniče se vychází z požadovaného maximálního zvlnění proudu. Zvlnění proudu, tj. rozdíl mezi jeho maximální a minimální hodnotou, lze vypočítat obdobně jako např. pro snižující pulzní měnič (vztah 3.11). Zatěžovatel z v tomto případě vyjadřuje poměrnou část trvání pulzu na primárním vinutí transformátoru z celkové maximální doby trvání pulzu, která je $T/2$. Z uvedeného vztahu je tedy zřejmé, že k největšímu zvlnění proudu bude docházet při $z = 0,5$, tj. šířka pulzu $T/4$.

$$\Delta i_z = \frac{U}{f \cdot L} \cdot z \cdot (1 - z) \quad (3.11)$$

Ze vztahu vyplývá také to, že k největšímu zvlnění dochází při maximálním vstupním napětí (v našem případě 100 V) a při nejnižší frekvenci (uvažováno 20 kHz). Maximální zvlnění proudu je zvoleno na hodnotu $\Delta i_z = 0,5 \text{ A}$. Po vyjádření ze vztahu 3.11 se indukčnost tlumivky vypočítá:

$$L = \frac{U}{\Delta i_z \cdot f} \cdot z \cdot (1 - z) = \frac{100}{0,5 \cdot 20000} \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5) = 2,5 \text{ mH} \quad (3.12)$$

[5, 9]

Na kondenzátory na vstupech měniče je požadavek malých parazitních vlastností kvůli vysokým spínacím frekvencím. Byly vybrány kondenzátory NICHICON UPW2E221MRD s nízkou impedancí o kapacitě 220 μF . Na každém vstupu měniče jsou paralelně zapojeny dva tyto kondenzátory pro zvýšení proudové kapacity.

3.2.5 Výpočet ztrát měniče

Výkonové ztráty měniče budou vypočítány pro případ, kdy směr toku energie měniče je ze zdroje U_1 do zdroje U_2 (dle schéma zapojení na obrázku 3.1). To znamená, že v napěťovém H-můstku budou vždy sepnuté dva tranzistory a v maticovém měniči budou také sepnuté dva příslušné tranzistory, ke kterým se musí přičíst výkonová ztráta na diodách. Frekvence spínání je 50 kHz a šířka pulzu je maximální, tedy $T/2$. Ztráty se počítají pro proud 10 A. V následujícím přehledu jsou uvedeny parametry tranzistoru a zpětné diody, které jsou použity při výpočtu ztrát měniče.

Tranzistor:

$$U_{CESAT} = 2,5 \text{ V}$$

$$E_{swref} = 12,2 \text{ mJ}$$

$$R_{thj-c} = 0,6 \text{ K/W}$$

Zpětná dioda:

$$U_{T0} = 1 \text{ V}$$

$$r_d = 16 \text{ m}\Omega$$

$$R_{thj-c} = 0,7 \text{ K/W}$$

Nejprve se vypočítá ztrátový výkon jednoho tranzistoru a diody. Doba vedení tranzistoru je půl periody, energie během vedení se tedy rovná:

$$\begin{aligned} E_{cond} &= U_{CESAT} \cdot I_C \cdot t_{cond} \\ E_{cond} &= 2,5 \cdot 10 \cdot \frac{1}{2 \cdot 50000} \\ E_{cond} &= 0,00025 \text{ J} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Energie při spínání E_{sw} se určí ze vztahu 3.14, který udává výrobce. Počítá se z referenční energie E_{swref} , referenčního proudu I_{ref} , referenčního napětí U_{ccref} a konkrétních hodnot napětí a proudu. Energie udaná v datasheetu tranzistorového modulu E_{swref} odpovídá referenčním hodnotám proudu a napětí.

$$\begin{aligned} E_{sw} &= E_{swref} \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \cdot \left(\frac{U_{cc}}{U_{ccref}} \right)^{1,3} \\ E_{sw} &= 0,0122 \cdot \left(\frac{10}{50} \right) \cdot \left(\frac{100}{600} \right)^{1,3} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$E_{sw} = 0,00024 J$$

Ztrátový výkon tranzistoru je:

$$\begin{aligned} P_{FAVT} &= f \cdot (E_{sw} + E_{cond}) \\ P_{FAVT} &= 50000 \cdot (0,00024 + 0,00025) \\ P_{FAVT} &= 24,5 W \end{aligned} \quad (3.15)$$

Ztrátový výkon diody se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$P_{FVD} = U_{T0} \cdot I_{FAV} + r_d \cdot I_{FRMS}^2 \quad (3.16)$$

Nejdříve určíme střední hodnotu proudu:

$$I_{FAV} = I \cdot \frac{t_{cond}}{T} = 10 \cdot \frac{25 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-6}} = 5 A \quad (3.17)$$

Druhá mocnina efektivní hodnoty proudu je:

$$I_{FRMS}^2 = I^2 \cdot \frac{t}{T} = 10^2 \cdot \frac{25 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-6}} = 50 A^2 \quad (3.18)$$

Po dosazení do vztahu 3.16 je ztrátový výkon diody:

$$\begin{aligned} P_{FVD} &= U_{T0} \cdot I_{FAV} + r_d \cdot I_{FRMS}^2 \\ P_{FVD} &= 1 \cdot 5 + 0,016 \cdot 50 \\ P_{FVD} &= 5,8 W \end{aligned} \quad (3.19)$$

Pro výpočet maximálního ztrátového výkonu uvažujeme vedení proudu v jednom okamžiku dvou tranzistorů z napěťového měniče a dvou tranzistorů a dvou diod z proudového měniče. Ztrátový výkon napěťového měniče P_{TOT1} a proudového měniče P_{TOT2} pak jsou:

$$\begin{aligned} P_{TOT1} &= 2 \cdot P_{FAVT} \\ P_{TOT1} &= 2 \cdot 24,5 \\ P_{TOT1} &= 49 W \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} P_{TOT2} &= 2 \cdot P_{FAVT} + 2 \cdot P_{FVD} \\ P_{TOT2} &= 2 \cdot 24,5 + 2 \cdot 5,8 \\ P_{TOT2} &= 60,6 W \end{aligned} \quad (3.21)$$

[26]

3.2.6 Dimenzování chlazení

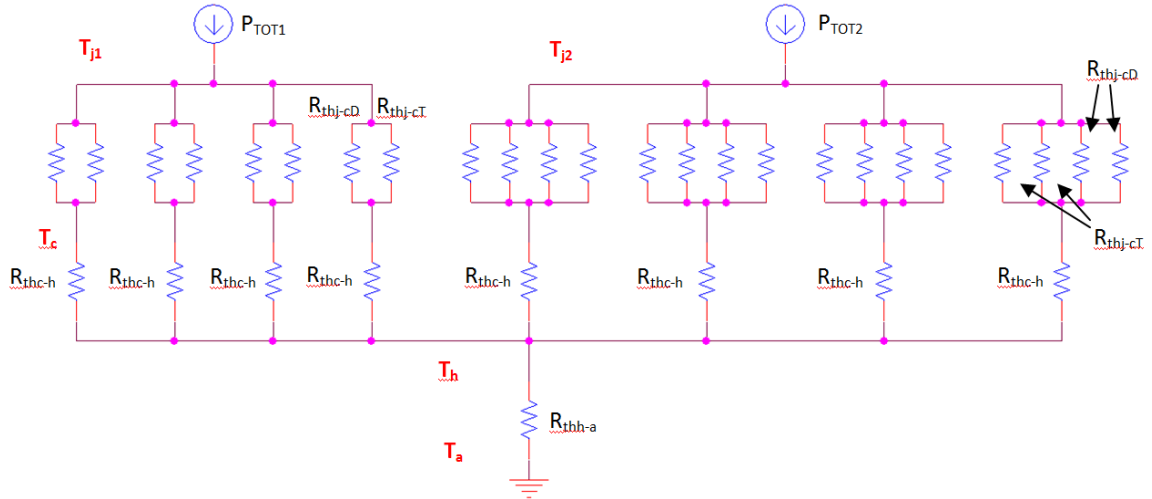
Vhodné chlazení je nepostradatelná součást výkonového měniče. Musí se zajistit, aby se při jakémkoliv funkčním režimu měniče nezvýšila maximální teplota polovodičových součástek nad přípustnou hodnotu, která bývá dána teplotou polovodičového přechodu T_j . Ze ztrátového výkonu měniče a jednotlivých tepelných odporů se vypočítají teploty, na které se při provozu měniče mohou jednotlivé prvky dostat. Důležité je zvolit vhodný chladič (jeho tepelný odpor), aby nebyla

překročena teplota přechodu T_j . Pro konkrétní řešení byl vybrán chladič L280 35.2, pro který bude provedena verifikace, zda teplota přechodu T_j nedosáhne maximální dovolené teploty dle datasheetu tranzistorového modulu. Všechny tranzistorové moduly jsou umístěny na jednom chladiči.

Výpočty budou vycházet z tepelného schématu měniče naznačeném na obrázku 3.9. Tepelné schéma je v podstatě rozděleno na dvě větve, což představuje napěťovou část měniče (střídač) a proudovou část měniče (maticový měnič). Ztrátový výkon P_{TOT1} jsou ztráty napěťové části měniče a P_{TOT2} jsou ztráty proudové části měniče. Protože v napěťovém měniči jsou zapojeny čtyři tranzistorové moduly, ve kterých je vždy použit jeden tranzistor a jedna dioda ze dvou, je ve schématu pro každý modul jeden tepelný odpor přechod-pouzdro tranzistoru R_{thj-cT} a jeden tepelný odpor přechod-pouzdro diody R_{thj-cD} . V proudovém (maticovém měniči) jsou využity všechny součástky tranzistorového modulu, v tepelném schématu jsou tedy dva tepelné odpory R_{thj-cT} a dva tepelné odpory R_{thj-cD} . Jednotlivé tepelné odpory jsou:

$$\begin{aligned} R_{thj-cD} &= 0,7 \text{ K/W} & R_{thc-h} &= 0,1 \text{ K/W} \\ R_{thj-cT} &= 0,6 \text{ K/W} & R_{thh-a} &= 0,51 \text{ K/W} \end{aligned}$$

Hodnoty tepelných odporů R_{thj-cD} a R_{thj-cT} vychází z datasheetu tranzistorového modulu SK60GM123. Tepelný odpor R_{thc-h} je odpor mezi pouzdrům modulu a chladičem, jeho hodnota závisí na použité teplovodivé pastě. Tepelný odpor chladiče R_{thh-a} je uváděn v datasheetu výrobce chladiče pro případ přirozeného chlazení.



Obr. 3.9: Tepelné schéma reverzibilního DC/DC měniče

Pro ověření vhodnosti vybraného chladiče se vypočítá teplota přechodu T_j . Teplota okolí T_a se uvažuje 40°C. Nejprve se určí teplota chladiče T_h :

$$\Delta T_{h-a} = (P_{TOT1} + P_{TOT2}) \cdot R_{thh-a} = (49 + 60,6) \cdot 0,51 = 55,9 \text{ °C} \quad (3.22)$$

$$T_h = \Delta T_{h-a} + T_a = 55,9 + 40 = 95,9 \text{ °C} \quad (3.23)$$

Pro tepelný odpor mezi přechodem a chladičem R_{thj-h} napěťové části měniče lze napsat:

$$R_{thj-h} = \frac{\frac{R_{thj-cD} \cdot R_{thj-cT}}{R_{thj-cD} + R_{thj-cT}} + R_{thc-h}}{4} = \frac{\frac{0,7 \cdot 0,6}{0,7 + 0,6} + 0,1}{4} = 0,11 \text{ K/W} \quad (3.24)$$

Teplota přechodu T_{j1} se pak rovná:

$$\Delta T_{j1-h} = P_{TOT1} \cdot R_{thj-h} = 49 \cdot 0,11 = 5,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.25)$$

$$T_{j1} = \Delta T_{j1-h} + T_h = 5,4 + 95,9 = 101,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.26)$$

Pro tepelný odpor mezi přechodem a chladičem R_{thj-h} proudové části měniče lze napsat:

$$R_{thj-h} = \frac{\frac{\frac{R_{thj-cD}}{2} \cdot \frac{R_{thj-cT}}{2}}{\frac{R_{thj-cD}}{2} + \frac{R_{thj-cT}}{2}} + R_{thc-h}}{4} = \frac{\frac{\frac{0,7}{2} \cdot \frac{0,6}{2}}{\frac{0,7}{2} + \frac{0,6}{2}} + 0,1}{4} = 0,07 \text{ K/W} \quad (3.27)$$

Teplota přechodu T_{j2} se pak rovná:

$$\Delta T_{j2-h} = P_{TOT2} \cdot R_{thj-h} = 60,6 \cdot 0,07 = 4,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.28)$$

$$T_{j2} = \Delta T_{j2-h} + T_h = 4,2 + 95,9 = 100,1 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.29)$$

Maximální dovolená teplota přechodu T_j tranzistorového modulu dle datasheetu je 150 $^{\circ}\text{C}$. Obě vypočítané teploty přechodu jsou menší a zvolený chladič lze tedy použít. [19, 25, 26]

3.2.7 Snímače napětí a proudu

K měření napětí a proudu měniče jsou použity snímače od firmy LEM. Jsou měřena vstupní/výstupní napětí a vstupní/výstupní proudy měniče. Celkem jsou tedy použity dva napěťové a dva proudové snímače. Co se týče umístění snímačů, jsou navrženy dvě stejné desky, přičemž každá obsahuje jedno proudové a jedno napěťové čidlo.

Snímač napětí

K měření vstupních/výstupních napětí je použit snímač LEM LV 25-P. Tento typ snímače využívá Hallova efektu a jeho základní parametry jsou uvedeny v tabulce 3.2.

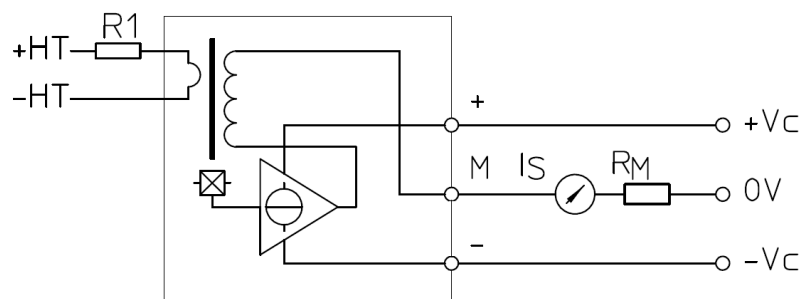
Tab. 3.2: Vybrané parametry napětového snímače LEM LV 25-P

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozsah měřeného napětí U_{PN}	10..500	V
Primární jmenovitý proud I_{PN}	10	mA
Rozsah primárního proudu I_{PM}	0..±14	mA
Sekundární jmenovitý proud I_{SN}	25	mA
Napájecí napětí U_C	±12..15	V

Na obrázku 3.10 je zobrazeno základní schéma zapojení napětového snímače dle datasheetu. Na vstupy +HT a –HT se přivádí měřené napětí U_P , pomocí rezistoru R_1 se nastavuje hodnota primárního proudu, jehož hodnota odpovídá velikosti měřeného napětí. Při určení hodnoty rezistoru R_1 se vychází z toho, že nominální měřená hodnota napětí bude 100 V. Hodnota rezistoru R_1 pak bude:

$$R_1 = \frac{U_P}{I_{PN}} = \frac{100}{0,01} = 10 \text{ k}\Omega \quad (3.30)$$

Na vstupy napětového snímače + a – se přivádí napájecí napětí ± 15 V. Z výstupu M se odebírá sekundární proud, jehož velikost odpovídá měřené hodnotě napětí. Sekundární proud způsobuje úbytek napětí na měřicím rezistoru R_M . Tento úbytek napětí tedy odpovídá měřenému napětí. V našem případě je signál mezi deskami snímačů a deskou s AD převodníky řídicího systému proudového charakteru, deska tedy neobsahuje měřicí rezistory, ale ty jsou umístěny u AD převodníků. [27, 29]



Obr. 3.10: Schéma zapojení napětového snímače LEM LV 25-P [27]

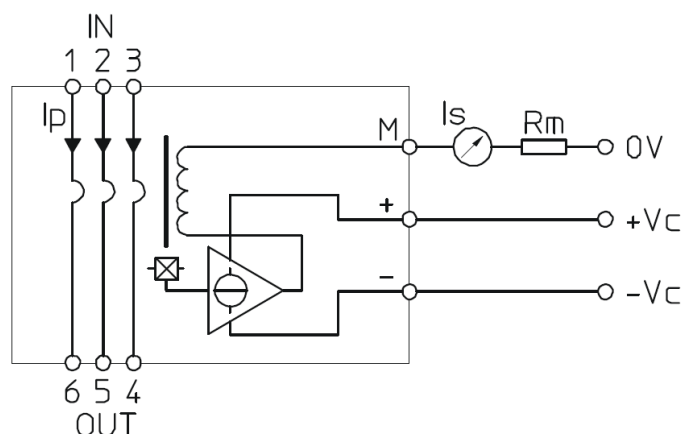
Snímač proudu

K měření vstupních/výstupních proudů je použit snímač LEM LAH 25-NP. Stejně jako u napětového snímače tento snímač využívá Hallova efektu s kompenzovanou smyčkou.

Tab. 3.3: Vybrané parametry proudového snímače LEM LAH 25-NP

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozsah měřeného proudu I_{PN}	8-12-25	A
Primární jmenovitý proud I_{PN}	25	A
Sekundární jmenovitý proud I_{SN}	25	mA
Napájecí napětí U_C	$\pm 12..15$	V

Na obrázku 3.11 je uvedeno schéma zapojení proudového snímače dle datasheetu. Tento typ snímače má 3 rozsahy pro vstupní měřený proud (viz. tabulka 3.3). Volba rozsahu se provádí pomocí různých kombinací propojení pinů 1 až 6. V našem případě se použije rozsah měřeného proudu do 25 A, což podle datasheetu znamená propojení pinů 1,2,3 dohromady a 4,5,6 dohromady. Sekundární jmenovitý proud pro tento rozsah je 25 mA.



Obr. 3.11: Schéma zapojení proudového snímače LEM LAH 25-NP [28]

Funkce dalších pinů proudového snímače je stejná jako u napěťového čidla. Na svorky + a – se přivádí napájecí napětí ± 15 V a výstup M slouží pro odebrání sekundárního proudu odpovídajícího měřenému primárnímu proudu. [28, 29]

3.2.8 Napájení

Napájení stejnosměrným napětím je potřebné pro řídicí systém, budiče a desky pro snímání napětí a proudu. K získání stejnosměrného napětí ze síťového napětí 230 V je použit spínaný napájecí zdroj, který poskytuje 24 V. Toto napětí je přivedeno na desky řídicího systému. Řídicí systém obsahuje DC/DC měniče, které přizpůsobují napětí 24 V na hodnoty potřebné pro své obvody (AD převodníky, DA převodníky, mikroprocesor,...). V řídicím systému je také vytvořeno napětí ± 15 V pro napájení DPS se snímači LEM a +15 V pro napájení budičů.

3.2.9 Řídicí systém

Na řídicí systém je kladen požadavek zejména z pohledu rychlosti, neboť je dosahováno spínacích frekvencí v desítkách kHz. Řídicí systém je postaven na DSP (digitální signálový procesor). Použitý systém byl již vytvořen na Katedře elektroniky. Skládá se ze tří desek plošných spojů: digitální, analogová a mikroprocesorová. Digitální DPS obsahuje rozhraní pro komunikaci RS485, I/O porty, výstupy PWM, napájecí svorky. Na analogové DPS jsou umístěny vstupy a výstupy pro AD a DA převodníky. Digitální signálový procesor je umístěn na procesorové desce plošných spojů. Jeho další popis přesahuje zadání této práce, proto budou využity pouze rozměry desek pro konstrukci 3D modelu měniče.

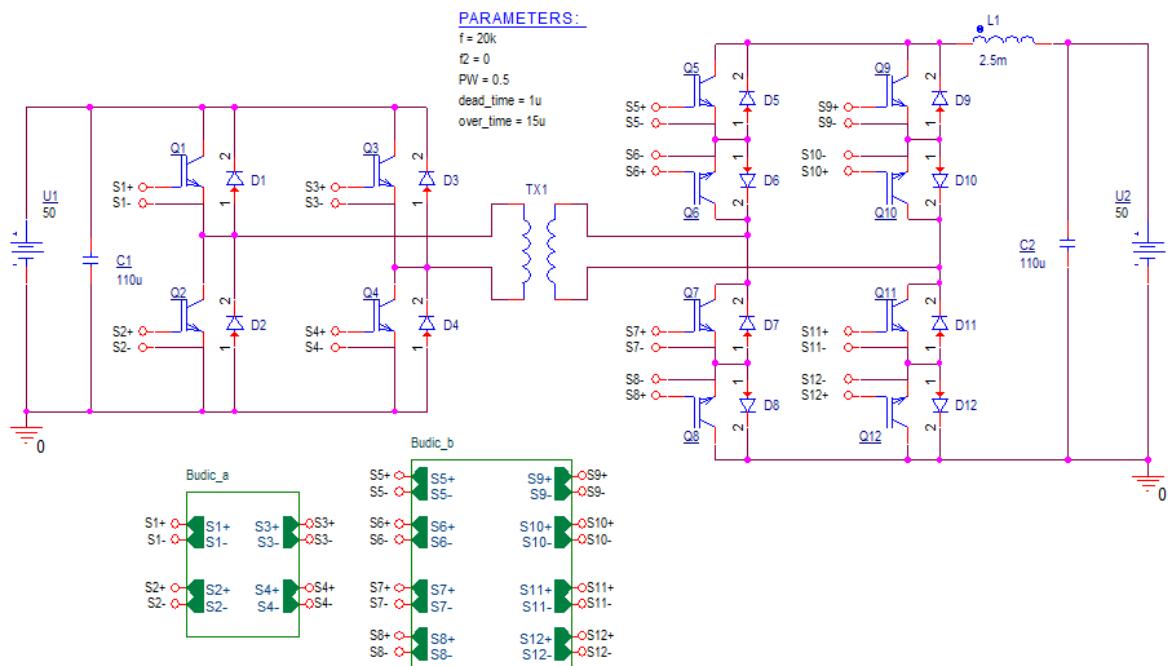
4 Simulace reverzibilního DC/DC měniče

Ověření funkce navrhnutého zapojení reverzibilního DC/DC měniče je provedeno simulací v programu OrCAD PSpice. Schéma zapojení v OrCADu je na obrázku 4.1. Celé schéma se skládá ze samotného zapojení měniče, budičů a pseudosoučástky PARAMETERS.

Pomocí PARAMETERS se nastavují globální proměnné pro simulaci. Proměnná „f“ je frekvence spínání tranzistorů při přenosu energie ze zdroje U1 do zdroje U2, proměnná „f2“ je frekvence spínání při přenosu energie ze zdroje U2 do zdroje U1. Pokud chceme provést simulaci při směru toku energie ze zdroje U1 do zdroje U2, nastaví se proměnná „f“ na požadovanou frekvenci a „f2“ se nastaví na hodnotu 0. Obdobně se hodnoty nastavují při opačném směru toku energie. Proměnná PW (Pulse Width) slouží k nastavení šířky obdélníkového pulzu a hodnota se nastavuje v rozmezí 0 až 1. Je to koeficient, který určuje, jak dlouho bude trvat obdélníkový pulz z maximálního času poloviny periody $T/2$. Pro dobu trvání pulzu lze napsat:

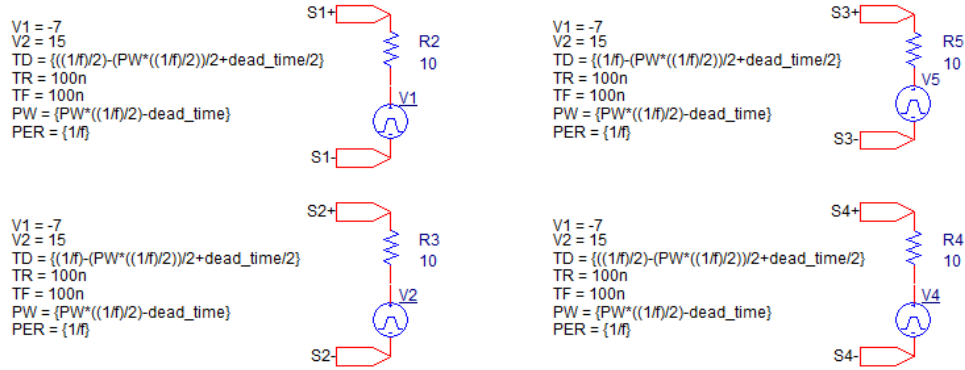
$$t_{on} = PW \cdot \frac{T}{2} \quad (4.1)$$

Touto proměnnou se řídí velikost přenášené energie měniče. Je třeba zmínit, že pro výše uvedený vztah je ignorována tzv. ochranná doba mezi spínáním tranzistorů v téže větvi. Globální proměnnou „dead_time“ se nastavuje požadovaná ochranná doba. Hodnota se běžně pohybuje v jednotkách μs . Pomocí proměnné „over_time“ se nastavuje doba trvání překrytí spínacích pulzů dvojic tranzistorů z téže větve proudového (maticového) měniče, což je nutné pro nepřerušení obvodu pro proud procházející tlumivkou.

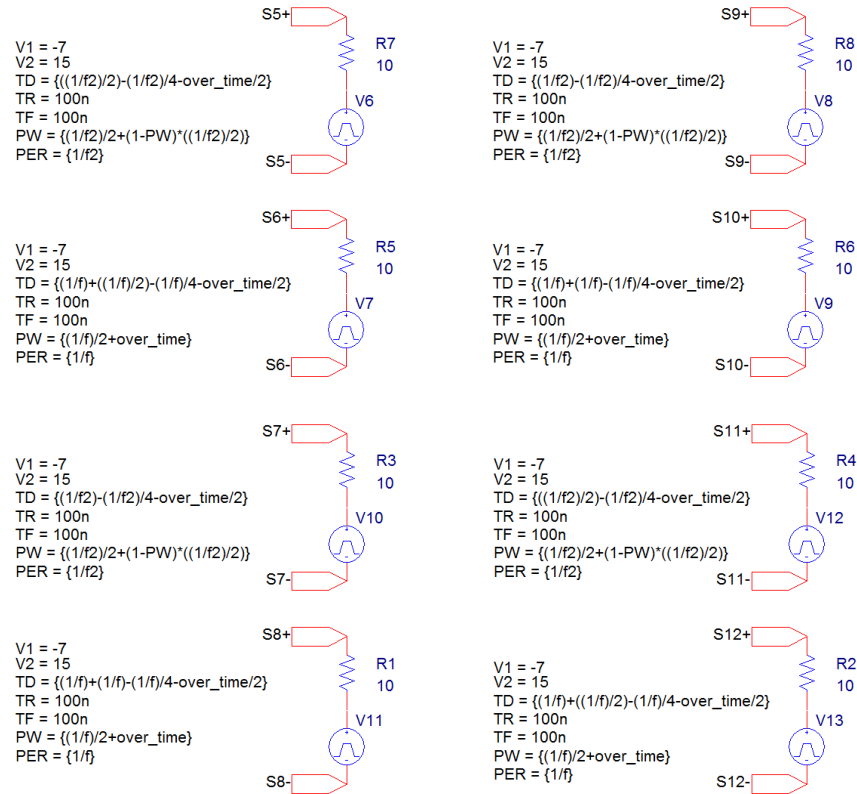


Obr. 4.1: Simulační schéma reverzibilního DC/DC měniče v programu OrCAD

Budicí obvody tranzistorů jsou ve schématu řešeny jako hierarchické bloky. Napět'ovému měniči patří budič označený „Budic_a“, k proudovému měniči budič „Budic_b“. Vnitřní zapojení hierarchických bloků budičů jsou na následujícím obrázku.



Obr. 4.2: Vnitřní struktura budiče „Budic_a“

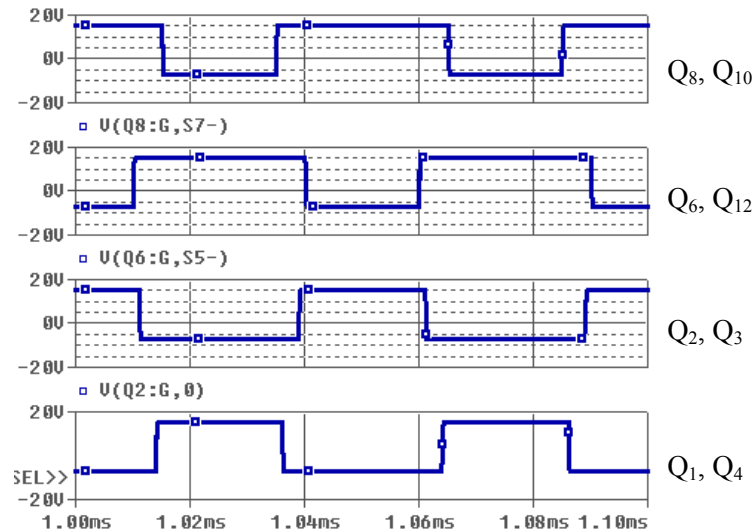


Obr. 4.3: Vnitřní struktura budiče „Budic_b“

Jednotlivé kanály budičů se skládají z pulzního zdroje napětí VPULSE a rezistoru, který určuje rychlost spínání tranzistoru. Pulzní zdroje generují +15 V pro zapnutí a -7 V pro vypnutí tranzistoru. Doba zpoždění zdroje napět'ového zdroje TD (Time Delay) a šířka pulzu PW (Pulse Width) jsou vhodně nastaveny tak, aby budicí pulzy tranzistorů byly generovány ve správnou chvíli a správnou dobou trvání s ohledem na spínací frekvenci a ochrannou dobu, resp. dobu překrytí u maticového měniče.

4.1 Simulace měniče při toku energie ze zdroje U_1 do zdroje U_2

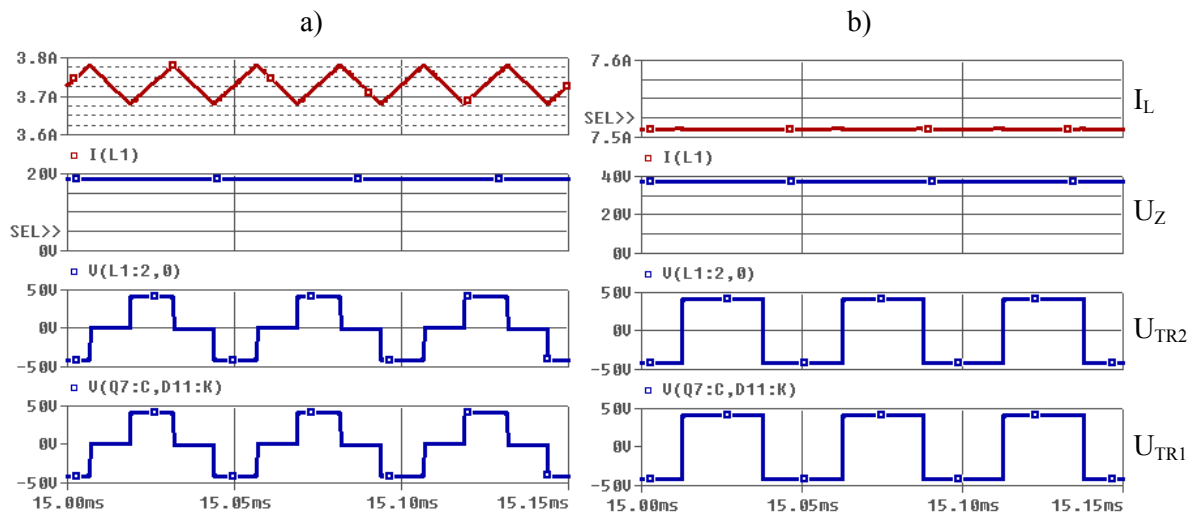
Na obrázku 4.4 jsou zobrazeny průběhy řídicích napětí na hradlech tranzistorů při spínací frekvenci 20 kHz maximální šířce pulzu ($PW = 1$). Dvojice tranzistorů napěťového měniče Q1, Q4 a Q2, Q3 jsou spínány střídavě s ochrannou dobou mezi nimi. V uvedeném případě je ochranná doba rovna 3 μs . Dvojice tranzistorů proudového měniče Q6, Q12 a Q8, Q10 jsou spínány střídavě, avšak jejich pulzy se překrývají. V tomto případě je doba překrytí pulzů 5 μs . Zbývající tranzistory proudového měniče (Q5, Q7, Q9, Q11) zůstávají vypnuté (na jejich řídicím hradle je připojeno napětí -7 V).



Obr. 4.4: Průběhy řídicích pulzů tranzistorů při toku energie ze zdroje U_1 do zdroje U_2

Při ověření funkce měniče simulací je na straně zátěže místo zdroje napětí použit rezistor. Zdroj V2 ze schématu (obrázek 4.1) je tedy nahrazen rezistorem. Na obrázku 4.5 jsou zobrazeny průběhy napětí a proudů měniče při spínací frekvenci 20 kHz při dvou různých šířkách obdélníkového pulzu ($PW = 0,5$ a $PW = 0,1$). Průběhy zobrazují napětí na primárním vinutí transformátoru U_{TR1} , napětí na sekundárním vinutí transformátoru U_{TR2} , napětí na zátěži U_Z a proud tlumivkou proudového měniče I_L .

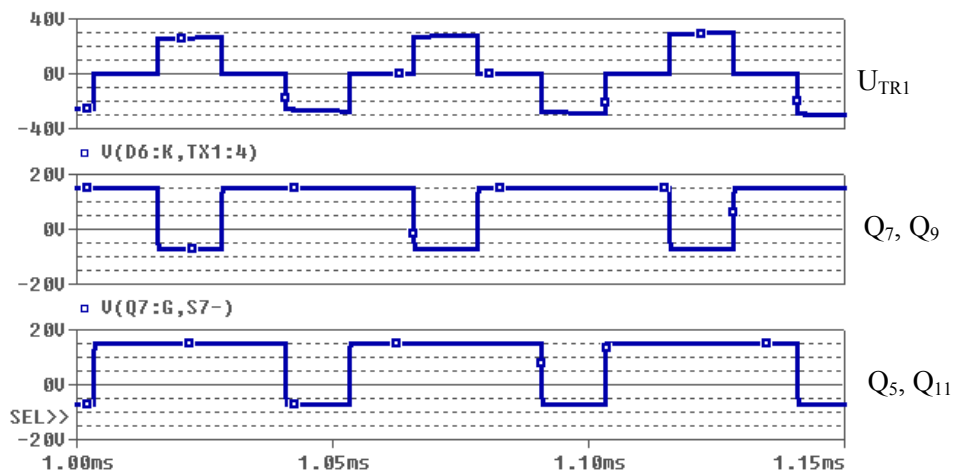
Z průběhů je zřejmé, že při větší šířce obdélníkového pulzu se přenáší větší výkon. Napětí na zátěži U_Z je cca dvojnásobné při $PW = 1$ proti napětí U_Z při $PW = 0,5$. Samozřejmě se zvětšil i proud tlumivkou I_L , taky cca dvojnásobně. Proud tlumivkou je při $PW = 1$ mnohem vyhlazenější. Při šířce pulzu $PW = 0,5$ dochází k největšímu zvlnění tohoto proudu.



Obr. 4.5: Průběhy napětí a proudu reverzibilního DC/DC měniče při toku energie ze zdroje U_1 do zdroje U_2 – a) $PW = 0,5$ b) $PW = 1$

4.2 Simulace měniče při toku energie ze zdroje U_2 do zdroje U_1

Při toku energie ze zdroje U_2 do zdroje U_1 se spínají pouze tranzistory proudového měniče Q5, Q7, Q9, Q11. Na obrázku 4.6 jsou uvedeny průběhy řídicích pulzů tranzistorů a odpovídající tvar napětí na primárním vinutí transformátoru. Řídicí pulzy dvojice tranzistorů Q7, Q9 a Q5, Q11 se překrývají, aby byl vždy otevřen obvod pro proud tlumivkou. V době, kdy se pulzy překrývají (sepnuty všechny čtyři tranzistory), je zdroj zkratován a napětí na transformátoru je nulové. V době, kdy je sepnuta pouze jedna z dvojic tranzistorů Q7, Q9 nebo Q5, Q11, se na transformátoru objeví napětí o příslušné polaritě.

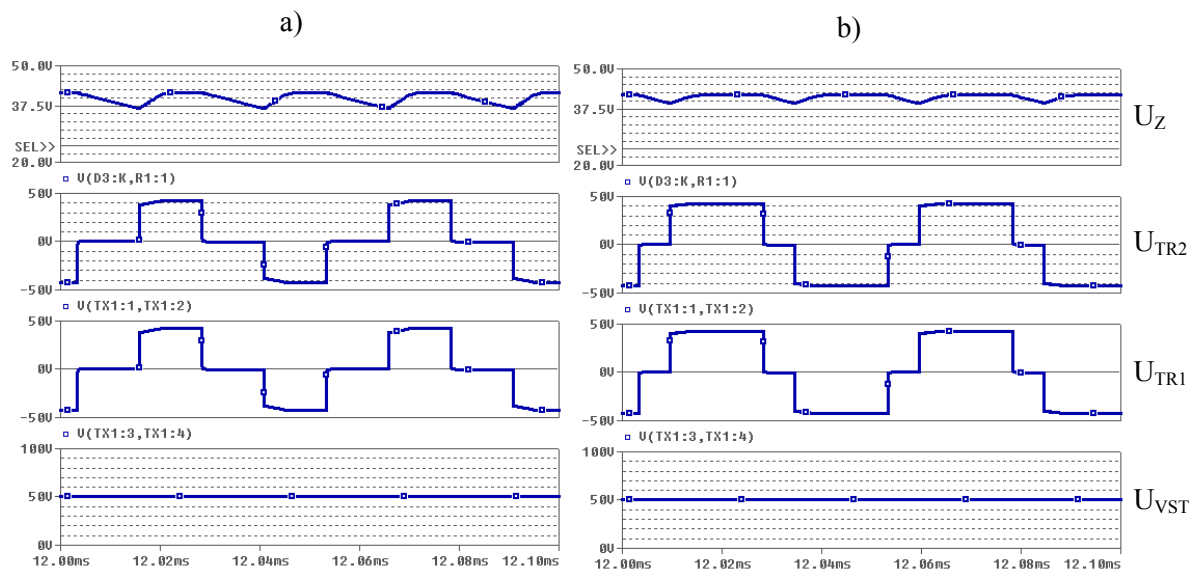


Obr. 4.6: Průběhy řídicích pulzů tranzistorů a napětí na primárním vinutí transformátoru

Při simulaci v režimu toku energie ze zdroje U_2 do zdroje U_1 se z globálních parametrů simulace nastavují pouze proměnné „f2“, která určuje spínací frekvenci a proměnná PW (Pulse Width), která určuje šířku pulzu na primárním vinutí transformátoru. Proměnná „f“ se ponechává

nulová. Hodnota proměnné PW se nastavuje od 0 do 1. Příklad průběhů z obrázku 4.6 je při $PW = 0,5$ (tj. šířka pulzu je $T/4$). Pokud by bylo $PW = 1$, doba překrytí spínacích pulzů by byla nulová a v době komutace by se proud tlumivky neměl kudy uzavírat. Proto je vhodné nenastavovat hodnotu PW až na maximální hodnotu 1.

Zdroj v zátěži (v tomto případě zdroj U1 dle obrázku 4.1) je pro ověření funkce nahrazen rezistorem. Na obrázku 4.7 jsou průběhy napětí pro hodnoty $PW = 0,5$ a $PW = 0,75$. Zobrazeno je napětí vstupní U_{VST} , napětí na primárním vinutí transformátoru U_{TR1} , napětí na sekundárním vinutí transformátoru U_{TR2} a napětí na zátěži U_Z . Při $PW = 0,5$ dosahuje napětí U_Z větší zvlnění než při $PW = 0,75$.

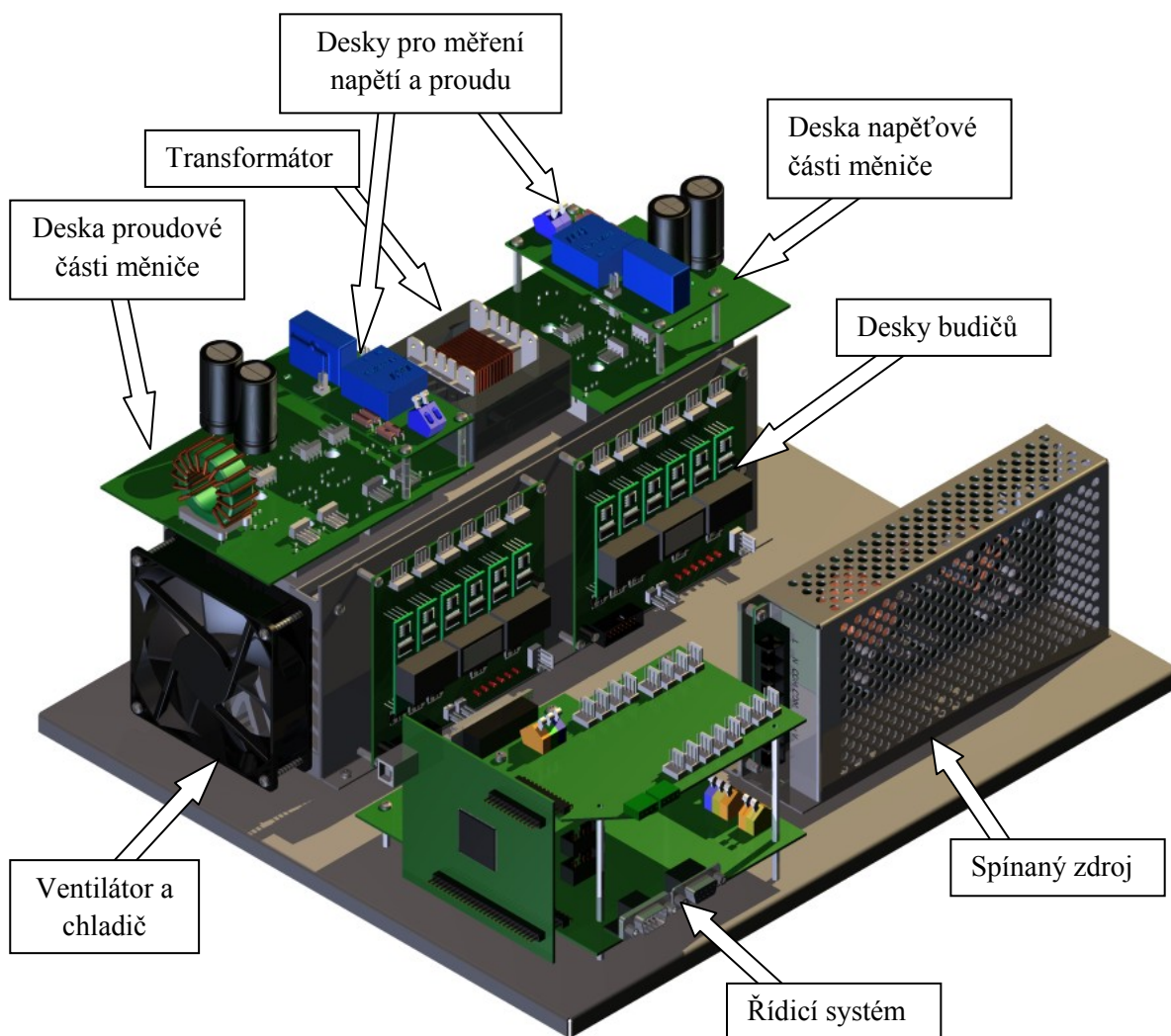


Obr. 4.7: Průběhy napětí reverzibilního DC/DC měniče při toku energie zdroje U_2 do zdroje U_1 –
a) $PW = 0,5$ b) $PW = 0,75$

5 3D model reverzibilního DC/DC měniče

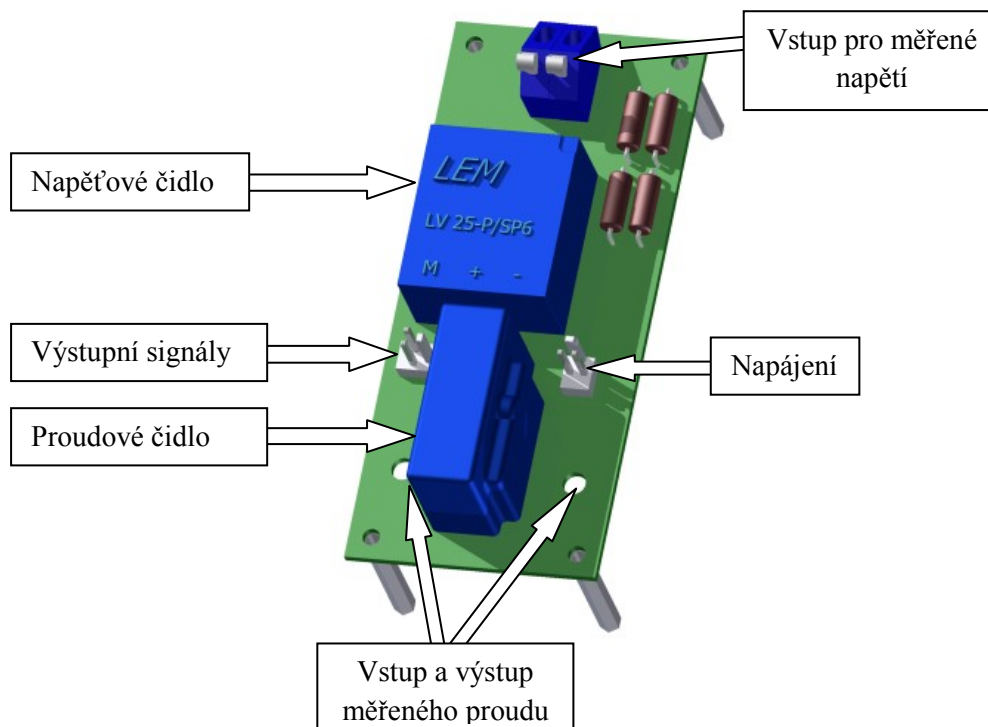
3D model reverzibilního DC/DC měniče je vytvořen v programu Autodesk Inventor. Na obrázku 5.1 je pohled na celý měnič. Model usnadňuje konstrukci měniče z hlediska prostorového rozložení jednotlivých komponent a také je například možné si zobrazit okótované výkresy rozložených plechů.

Všechny komponenty měniče jsou umístěny na podstavě z plechu o rozměrech 390 x 340 mm. Chladič je přichycen pomocí plechů a šroubů k podstavě. Na chladiči jsou přišroubovány tranzistorové moduly, na kterých jsou desky plošných spojů proudového a napěťového měniče. Na těchto deskách stojí desky pro měření napětí a proudu. Kostra transformátoru je také přichycena pomocí plechů a šroubů k chladiči. Na plechu z boku chladiče jsou umístěny desky budičů tak, aby výstupní konektory byly blízko ke konektorům řídicího signálu tranzistorů na deskách proudového a napěťového měniče.

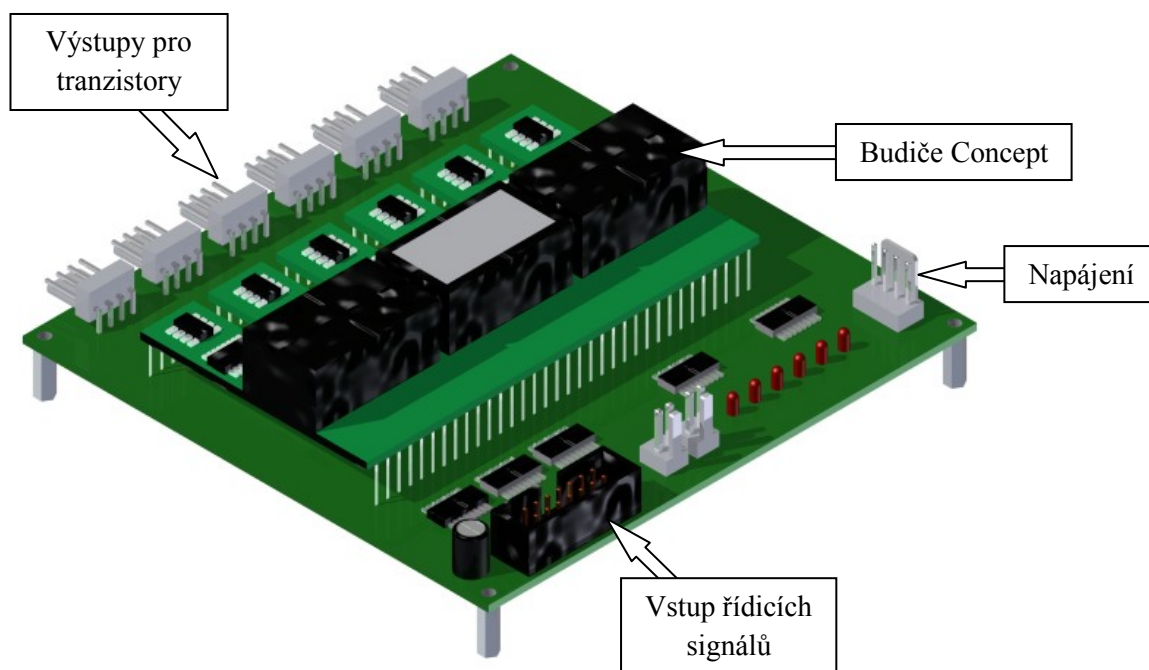


Obr. 5.1: 3D model reverzibilního DC/DC měniče

Na obrázku 5.2 je detail 3D modelu desky pro měření napětí a proudu s čidly LEM. Tato deska plošných spojů má rozměry 100 x 44 mm. Obrázek 5.3 zobrazuje 3D model desky budičů s budiči Concept 6SD106EI. Deska má rozměry 105 x 110 mm.

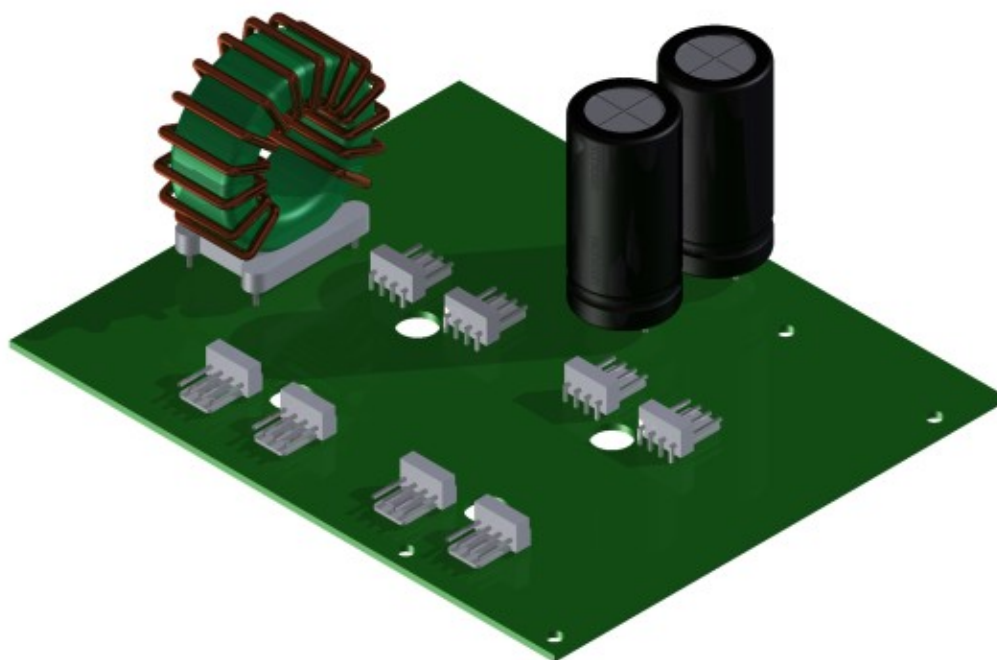


Obr. 5.2: 3D model desky pro měření napětí a proudu

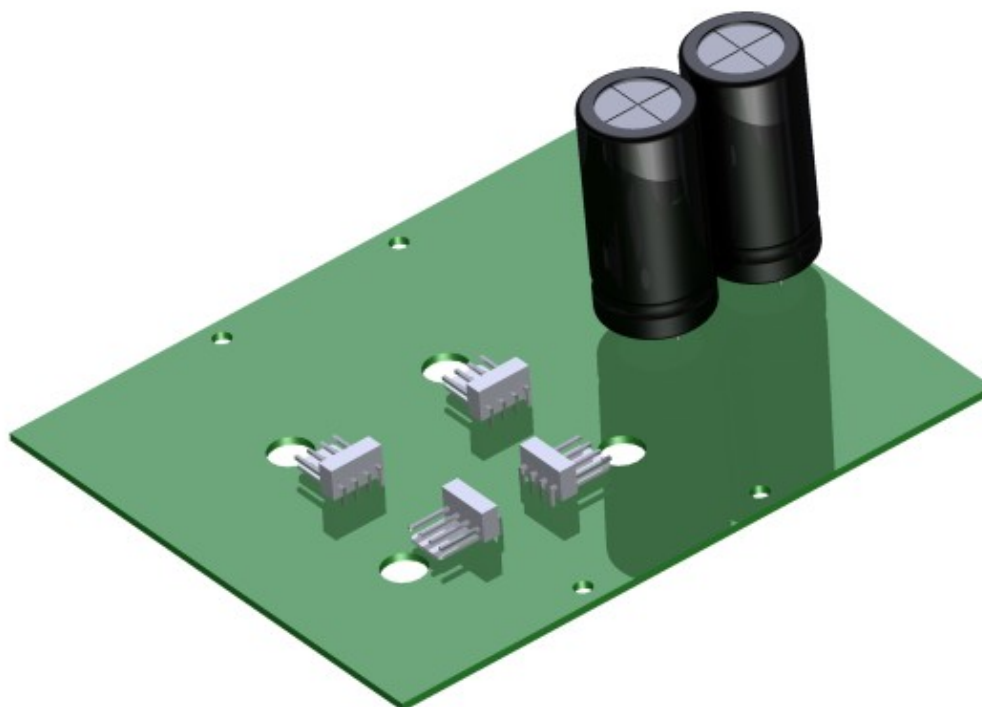


Obr. 5.3: 3D model DPS budičů

Na následujících obrázcích jsou desky plošných spojů proudového měniče (Obr. 5.4) a napěťového měniče (Obr. 5.5). Desky obsahují filtrační kondenzátory, tlumivku a konektory pro řídicí napětí tranzistorů. Otvory u konektorů slouží pro vstup šroubů k připevnění tranzistorových modulů k chladiči.



Obr. 5.4: 3D model DPS proudové části měniče



Obr. 5.5: 3D model DPS napěťové části měniče

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout výkonovou část reverzibilního DC/DC měniče a analyzovat funkci konkrétního zapojení. V první teoretické části jsou rozebrány topologie pro obousměrný přenos elektrické energie v soustavách s akumulacími systémy. Akumulační jednotky jsou třeba v ostrovních systémech obnovitelných zdrojů, protože vyrobená energie obnovitelnými zdroji je v čase nestálá. Akumulační jednotky se nabíjí během dostatku energie a dodávají energii ve chvílích, kdy nastává pokles vyrobené energie obnovitelnými zdroji. Příkladem je střídání dne a noci u fotovoltaických elektráren. Tyto topologie jsou univerzální a upravují se pro použití v konkrétních aplikacích.

V další kapitole teoretické části práce jsou popsána obvodová řešení reverzibilních DC/DC měničů. Tyto měniče se dělí na měniče bez galvanického oddělení a měniče s galvanickým oddělením, které je provedeno pomocí transformátorové vazby.

Další část práce se zabývá řešením vybraného zapojení reverzibilního DC/DC měniče. Měnič se skládá ze dvou částí - z napěťového a proudového měniče. Napěťový měnič je řešen jako jednofázový střídač. Proudová část měniče je řešena jako maticový měnič. Tranzistory spínačů maticového měniče jsou zapojeny antisériově, aby bylo dosaženo vlastností obousměrného spínače. V kapitole je popsána funkce měniče při obou směrech toku energie. Dále je provedeno dimenzování a výběr jednotlivých komponent pro výkonovou část měniče. Byly zvoleny vhodné tranzistorové moduly od firmy Semikron a budiče od firmy Concept. Při návrhu chlazení pro tranzistorové moduly byl nejprve určen maximální ztrátový výkon, ke kterému může při provozu dojít. Ztrátový výkon se vypočítal při režimu přenosu energie ze zdroje U_1 do zdroje U_2 , tedy ze strany napěťového na stranu proudového měniče, a to při maximální šířce obdélníkového pulzu, tj. půlperioda. Při znalosti ztrátových výkonů napěťového a proudového měniče se zvolil konkrétní chladič (se známým tepelným odporem) a teplota okolí a pro tyto hodnoty se zpětně ověřovalo, zda je maximální teplota přechodu polovodičových součástek při provozu měniče menší, než je jejich maximální dovolená teplota přechodu. Návrh impulzního transformátoru vycházel z minimální frekvence, napětí a maximálního zdvihu magnetické indukce. Jádrem bylo vybráno od výrobce Ferroxcube a materiál vhodný pro pracovní frekvenci je 3C90. Ze vstupních veličin a údajů z datasheetu jádra se určil potřebný počet závitů. Hodnota indukčnosti tlumivky, která je zapojena na vstupu proudového měniče, se určuje s ohledem na maximální zvlnění proudu, ke kterému může dojít. Velikost zvlnění byla určena na 0,5 A, pro tuto hodnotu vychází indukčnost tlumivky 2,5 mH.

Simulační model reverzibilního DC/DC měniče byl vytvořen v programu OrCAD Pspice. Simulační parametry se v modelu zadávají jako globální proměnné pomocí pseudosoučástky Parameters. Simulačními parametry jsou frekvence, šířka obdélníkového pulzu, ochranná doba (mezi sepnutí tranzistorů napěťového měniče v jedné větvi) a doba překrytí (doba, po kterou jsou sepnuty tranzistory proudového měniče v jedné větvi zároveň). Budiče tranzistorů jsou v simulačním zapojení řešeny jako hierarchické bloky. Simulace jsou nejdříve provedeny pro režim přenosu energie ze zdroje U_1 do zdroje U_2 , tedy ze strany napěťového na stranu proudového měniče. Výstupní průběhy ukazují řídicí signály jednotlivých tranzistorů a jsou zobrazeny i průběhy napětí a proudu při různých šířkách obdélníkového pulzu. Průběhy řídicích signálů a

jednotlivých napětí jsou simulovány i pro opačný přenos energie měničem, tedy ze zdroje U_2 do zdroje U_1 .

Pro vizualizaci konstrukční části je vytvořen 3D model reverzibilního DC/DC měniče v programu Autodesk Inventor. Model usnadňuje konstrukci měniče, zejména z hlediska rozvržení jednotlivých komponent. Program také umožňuje vytvoření okótovaných výkresů, které mají využití při vyrábění plechů a vrtání otvorů. 3D model zobrazuje komponenty měniče uchycené na plechovou podstavu. K této podstavě je připevněn chladič a na něm je transformátor a tranzistorové moduly a deskami plošných spojů. Z boku chladiče jsou umístěny budiče s výstupy co nejbližší k tranzistorovým modulům. Napájecí spínaný zdroj a řídicí systém pak stojí samostatně na plechové podstavě.

Rozšířením řešeného zapojení reverzibilního DC/DC měniče může být snaha o dosažení vyšších spínacích frekvencí. To však klade důraz na použité komponenty a provedení měniče. V první řadě se mohou použít rychlejší SiC tranzistory a je zde požadavek i na rychlost budičích obvodů. Také vodivé spoje musí být co nejlépe provedeny z hlediska parazitních vlastností, které hrají velikou roli ve vyšších frekvencích. V neposlední řadě je zde požadavek na rychlost řídicího systému, který generuje řídicí signály. V této aplikaci se nabízí například použití programovatelného hradlového pole FPGA.

Použitá literatura

Monografické publikace

- [1] Mastný, Petr a kol.: *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] Cenek, Miroslav: *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 80-86534-03-0.
- [3] Sorensen, Bent: *Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage*. Academic Press, 2007. ISBN 978-0123742629.
- [4] Krejčířík, Alexandr: *Moderní spínané zdroje*. Praha: BEN – Technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-303-6.
- [5] Faktor, Zdeněk: *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN – Technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [6] Faktor, Zdeněk: *Transformátory a cívky*. Praha: BEN – Technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-49X.
- [7] Billings, Keith a Morey, Taylor: *Switchmode Power Supply Handbook, Third Edition*. The McGraw-Hill Companies, 2011. ISBN 978-0-07-163972-9.
- [8] Pressman I., Abraham; Billings, Keith a Morey, Taylor: *Switching Power Supply Design, Third Edition*. The McGraw-Hill Companies, 2009. ISBN 978-0-07-159432-5.
- [9] Vondrášek, František: *Výkonová elektronika – měniče s vlastní komutací a bez komutace, svazek 3*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-980-X.

Elektronické zdroje

- [10] *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice*. [online]. [cit. 2015-3-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf>
- [11] Alliance for Rural Electrification. *Hybrid power systems based on renewable energies*. [online]. [cit. 2015-3-20]. Dostupné z: http://www.ruralelec.org/fileadmin/DATA/Documents/06_Publications/Position_papers/A_RE-WG_Technological_Solutions_-_Brochure_Hybrid_Systems.pdf
- [12] Li, Wuhua. *A Review of Non-Isolated High Step-Up DC/DC Converters in Renewable Energy Applications*. College of Electrical Engineering, Zhejiang University. [online]. [cit. 2015-3-21]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4802683>

- [13] Negi, Swati a Mathew, Lini. *Hybrid Renewable Energy System: A Review*. [online]. [cit. 2015-3-21].
Dostupné z: http://www.ripublication.com/irph/ijeeee_spl/ijeeev7n5_15.pdf
- [14] Jahanbani, Fatemeh a Riahy, Gholam H.: *Optimum Design of a Hybrid Renewable Energy System*. Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Iran. [online]. [cit. 2015-3-25].
Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/22686.pdf>
- [15] Bhandari, Binayak: *Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. [online]. [cit. 2015-3-27].
Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40684-015-0013-z#page-1>
- [16] Zhou, Haihua; Bhattacharya, Tanmoy a Khambadkone, Ashwin M.: *Composite Energy Storage System Using Dynamic Energy Management in Microgrid Applications*. National University of Singapore, Singapore. [online]. [cit. 2015-4-11].
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5543543>
- [17] Karshenas, Hamid R.; Daneshpajoo, Hamid; Safaei, Alireza; Jain, Praveen a Bakhsai, Alireza: *Bidirectional DC-DC Converters for Energy Storage Systems*. Department of Electrical and Computer Engineering, Queen's University, Kingston; Isfahan University of Tech., Isfahan; Canada, Iran. [online]. [cit. 2015-3-28].
Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/20368.pdf>
- [18] Krismer, F.; Biela, J. a Kolar, J.W.: *A comparative evaluation of isolated bi-directional DC/DC converters with wide input and output voltage range*. Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, Switzerland. [online]. [cit. 2015-3-28].
Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1518368&tag=1
- [19] Datasheet. *SEMIKRON, SK60GMI23*. [online]. [cit. 2015-3-20].
Dostupné z: <http://www.semikron.com/download/assets/gecont/2406.pdf>
- [20] Datasheet. *Six-pack SCALE Driver 6SD106EI for IGBTs and Power MOSFETs*. [online]. [cit. 2015-4-20].
Dostupné z: <http://igbt-driver.power.com/products/scale-1-driver-cores/6sd106ei/6sd106ei/>
- [21] *Description and Application Manual for SCALE Drivers*. [online]. [cit. 2015-4-20].
Dostupné z: http://igbt-driver.power.com/products/application_manuals/
- [22] Datasheet. *E65/32/27. E cores and accessories*. Ferroxcube. [online]. [cit. 2015-4-3].
Dostupné z: <http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/datasheet/e653227.pdf>
- [23] Datasheet. *3C90, Material specification*. Ferroxcube. [online] [cit. 2015-4-3].
Dostupné z: <http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/datasheet/3c90.pdf>

-
- [24] *Soft Ferrites and Accessories, Data Handbook*. Ferroxcube, 2013. [online]. [cit. 2015-4-3].
Dostupné z: http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/datasheet/FXC_HB2013.pdf
 - [25] *Chladiče a příslušenství*. ČKD Elektrotechnika. [online]. [cit. 2015-4-8].
Dostupné z: http://www.ckde.cz/kiwi_files/CKDE/ckde.katalog_chladice.cz.pdf
 - [26] *Determining switching losses of SEMIKRON IGBT modules*. [online]. [cit. 2015-4-28].
Dostupné z: <http://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-note-an-1403-switchinglosses-en>
 - [27] Datasheet. *Voltage Transducer LV 25-P*. LEM. [online]. [cit. 2015-4-22].
Dostupné z: <http://www.lem.com/docs/products/lv%2025-p.pdf>
 - [28] Datasheet. *Current Transducer LAH 25-NP*. LEM. [online]. [cit. 2015-4-22].
Dostupné z: <http://www.lem.com/docs/products/lah%2025-np%20e.pdf>
 - [29] *Isolated current and voltage transducers, characteristics – applications – calculations*. LEM. [online]. [cit. 2015-4-22].
Dostupné z: http://www.lem.com/images/stories/files/Products/P1_5_1_industry/CH24101E.pdf